



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**PEKKA MARTIKAINEN**  
**SUPRAJOHTAVA VIKAVIRRRANRAJOITIN HAJAUTETUSSA**  
**ENERGIANTUOTANNOSSA**

Diplomityö

Tarkastajat: Lehtori Risto Mikkonen  
ja tutkijatohtori Antti Stenvall  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan  
tiedekuntaneuvoston  
kokouksessa 3. maaliskuuta 2010

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**MARTIKAINEN, PEKKA:** Suprajohtava vikavirranrajoitin hajautetussa energiantuotannossa

Diplomityö, 81 sivua

Kesäkuu 2010

Pääaine: Elektroniikan laitesuunnittelu

Tarkastajat: lehtori Risto Mikkonen ja tutkijatohtori Antti Stenvall

Avainsanat: Vikavirranrajoittimet, hajautettu energiantuotanto, suprajohtavuus

Sähköverkkojen kuormitus kasvaa jatkuvasti kulutuksen kasvaessa, ja tämän myötä myös vikavirrat lisääntyvät. Tämä lisää tarvetta verkon uudistamiseen ja suojalaitteiden lisäämiseen, mikä aiheuttaa merkittäviä kustannuksia. Tuotannon kehittyessä verkkoon myös liitetään uusia energiantuotantomuotoja, kuten hajautettua tuotantoa. Tämä lähellä käyttäjää tapahtuva energiantuotanto tuo uusia ongelmia verkkoon ja sen suojaukseen. Perinteiset vikavirranrajoittimet lisäävät verkon häviöitä eivätkä toimi tarpeeksi nopeasti ja tehokkaasti nykypäivän tarpeisiin. Tämän takia onkin pyritty kehittämään suprajohteita hyödyntäviä vikavirranrajoittimia (SCFCL), jotka ovat häviöttömiä, tehokkaita ja nopeita. Hajautetussa tuotannossa tuulivoima on yksi nopeimmin kehittyvistä teknologioista. Nykyisellään suojausjärjestelmät ovat kuitenkin puutteelliset, ja jotta tuulivoiman tuotantoa voidaan kehittää, on vikavirtasuojaukseen panostettava.

Työn tarkoituksena on perehtyä suprajohtaviin vikavirranrajoittimiin, niiden taustalla olevaan ajatukseen, tekniikkaan, materiaaleihin ja käyttökohteisiin, eritoten SCFCL:n mahdollisuuksiin merituulipuistokäytössä. Työssä mitoitettiin ja suunniteltiin sekä resistiivinen että induktiivinen vikavirranrajoitin. Resisttiivisen vikavirranrajoittimen johtimen mallinnuksessa havaittiin, että tarvittavien rajoitinominaisuuksien saavuttamiseksi johtimesta tulisi hyvin pitkä, mutta se olisi mahdollista valmistaa. Voidaan kuitenkin olettaa, että johtimen valmistuksen ja siinä käytettävän jäähdytysjärjestelmän hinta olisi korkea. Induktiivisen SCFCL:n mallinnuksessa saavutettiin myös halutut ominaisuudet, ja rakenne havaittiin mahdolliseksi toteuttaa. Suprajohtavat vikavirranrajoittimet ovat hyvä vaihtoehto halutun suojauksen saavuttamiseksi. Markkinoilla laitteita ei vielä ole, mutta tutkimusta on tehty runsaasti ja järjestelmien toimivuus on todistettu. Jotta suprajohtavaa vikavirranrajoitinta voidaan alkaa markkinoida ja myydä suuressa mittakaavassa, on kuitenkin yhä kehitystä tapahduttava.

# ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

**PEKKA MARTIKAINEN:** Superconducting Fault Current Limiter in Distributed Generation

Master of Science Thesis, 81 pages

June 2010

Major: Electrical engineering

Examiner: Lecturer Risto Mikkonen and post-doc researcher Antti Stenvall

Keywords: Fault current limiter, superconductivity, distributed generation

With growing of the Electricity consumption in the world, and the need for safe and uninterrupted power delivery to the costumers, it is required to take the increasing fault currents into account. As the energy production continues to develop, new types of power schemes are introduced into the electric power system. Distributed generation is one of them.

The distributed generation, or DG, is electricity production that is on-site or close to the load centre and is interconnected to the utility distribution system. Fault current problems are often faced when electric power system is expanded. Structures that are meant to enhance the reliability of the scheme, such as parallel systems raise the levels of the fault current forcing the replacement of existing switchgear and limiters not rated for the new fault duty. A promising answer to this problem is superconducting fault current limiter SCFCL. It restricts fault currents fast, efficiently and with minimal loss.

Wind power is one of the fastest developing technologies in the field of distributed generation. As of now, the limiters in the distribution system have not been able to live up to their task. In order to further develop the technology, fault currents must be taken into account more seriously. Superconducting Fault current limiter servers as a promising answer to solve the problem. In this thesis, different kinds of superconducting fault current limiters were examined, as well as their applications and materials. A modeling of two SCFCL was performed, a resistive SCFCL, fabricated with YBCO, and an inductive SCFCL, fabricated with  $MgB_2$ . As a result of the modeling of the resistive fault current limiter, it was found that the amount of superconductive wire needed to manufacture the limiter is very large, which can cause problems. Still, the concept is feasible. The inductive fault current limiter was also found to be equally feasible and a possible system to replace the traditional protection system in the electric power system.

These limiters are not developed enough to be ready for everyday use but they have been under a lot of studies and the basic functionality of the system has been verified. In order to get the SCFCL into market and ready for use on a larger scale, development must be made.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston elektroniikan laitoksen sähkömagneetiikan osastolle. Työn ohjaajina ja tarkastajina toimivat Risto Mikkonen ja Antti Stenvall, joita haluan kiittää saamastani mahdollisuudesta. Lisäksi iso kiitos kuuluu sähkömagneetiikan muulle työporukalle, SMG:n jalkapallojoukkueelle ja kahvipöydän vakiokasvoille, joiden seurassa tyhjää lyövät aivot saivat lisäannoksen innostusta, sekä Arto Poutalalle mallinnuksessa saamastani avusta.

Diplomityö päättää opiskeluni Tampereen teknillisessä yliopistossa. Opiskeluvuosien aikana olen saanut monia ystäviä, ja heitä haluan kiittää unohtumattomista hetkistä. Lisäksi haluan kiittää tyttöystävääni Anna-Maria sekä perhettäni. Kiitokset ymmärryksestä ja jaksamisesta.

*”You have to get the butterflies to fly in formation, that’s the trick.”*

– Steve Bull

Pekka Martikainen

Tampereella, 14.4.2010

## SISÄLLYS

1.	Johdanto .....	2
2.	Hajautettu energiantuotanto .....	4
2.1.	Energiantuotanto .....	4
2.2.	Hajautetun energiantuotannon teknologiat .....	8
2.3.	Vikavirrat ja hajautetun tuotannon aiheuttamat ongelmat .....	13
2.4.	Liiketoiminta .....	18
3.	Suprajohtavuus .....	23
3.1.	Suprajohtavuusilmiö .....	23
3.2.	Suprajohtavat materiaalit .....	25
3.2.1.	Matalan lämpötilan suprajohteet .....	27
3.2.2.	Korkean lämpötilan suprajohteet .....	28
3.3.	Suprajohdesovellukset .....	30
3.4.	Suprajohteet hajautetussa energiantuotannossa .....	31
3.5.	Suprajohtavat vikavirranrajoittimet .....	32
3.5.1.	Induktiivinen vikavirranrajoitin .....	34
3.5.2.	Resistiivinen vikavirranrajoitin .....	35
4.	Suprajohtava virranrajoitin offshore -tuulipuistossa .....	38
4.1.	Tuulivoiman kehitystrendit .....	38
4.2.	Offshore-tuulivoimalat .....	39
4.3.	SCFCL:n soveltuvuus tuulivoimaloihin .....	42
4.4.	Tuulipuiston koon määrittäminen .....	43
4.5.	SCFCL:n virranrajoitusominaisuuksien kiinnittäminen .....	45
5.	SCFCL:n mallinnus ja mitoitus .....	48
5.1.	2G-suprajohde YBCO .....	48
5.1.1.	YBCO:n ominaisuudet ja rakenne .....	48
5.1.2.	YBCO-johteiden valmistajat ja tuotteet .....	51
5.2.	MgB <sub>2</sub> -suprajohde .....	53
5.2.1.	MgB <sub>2</sub> -suprajohteen ominaisuudet ja rakenne .....	54
5.2.2.	MgB <sub>2</sub> -johdinten valmistajat ja tuotteet .....	55
5.3.	SCFCL:n HTS-moduulin suunnittelu .....	56
5.3.1.	Resistiivinen 2G SCFCL .....	56
5.3.2.	Induktiivinen MgB <sub>2</sub> SCFCL .....	60
6.	Teknistaloudellinen analyysi .....	66
6.1.	Kustannukset .....	66
6.2.	Luotettavuus .....	68
6.3.	Vertailu .....	69
7.	Yhteenveto .....	71
8.	Lähteet .....	73

## TERMIT JA LYHENTEET

<b>SCFCL</b>	Suprajohtava vikavirranrajoitin
<b>DG</b>	Hajautettu tuotanto
<b>WADE</b>	World Alliance of Decentralized Energy
<b>CHP</b>	Combined Heat and Power, yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto
<b>EREC</b>	European Renewable Energy Council
<b>CECA</b>	Consumer Energy Council of America
<b>ROCOF</b>	Rate of Change of Frequency, taajuusderivaattaan perustuva yksinsyöttötilanteen tunnistamismenetelmä
<b>BCS-teoria</b>	Suprajohtavuuden teoreettinen selitys, (John Bardeen, Leon Cooper ja John Schrieffer)
<b>H<sub>c</sub></b>	Suprajohteen kriittinen magneettikentän voimakkuus
<b>B</b>	Magneettivuon tiheys
<b>LTS</b>	Low temperature superconductor, matalan lämpötilan suprajohde
<b>HTS</b>	High temperature superconductor, korkean lämpötilan suprajohde
<b>PIT</b>	Powder in tube, korkean lämpötilan suprajohteen yksi valmistusmenetelmä
<b>YBCO</b>	Yttrium-barium-kuparioksidi, keraaminen korkean lämpötilan suprajohde
<b>MRI-laite</b>	Magnetic Resonance Imaging, magneettiresonanssikuvauslaite
<b>CERN</b>	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuskeskus
<b>LHC</b>	Large Hadron Collider (suuri hadronitörmäytin) -nimellä tunnettava hiukkastörmäytin
<b>SMES</b>	Superconducting magnetic energy storage, suprajohtava magneettinen energiavarasto
<b>DC</b>	Direct current, tasavirta
<b>AC</b>	Alternating current, vaihtovirta
<b>2G</b>	Toisen sukupolven HTS -suprajohde
<b>EWEA</b>	European Wind Energy Association, tuulivoimatuottajien edunvalvontajärjestö, joka edistää tuulivoiman käyttöä Euroopassa ja maailmassa.

<b>LIMSAT</b>	Italialainen tutkimus- ja kehitysprojekti, jossa kehiteltiin resistiivisiä SCFCL-konsepteja
$U_n$	Jännitetaso jakeluverkossa
$I_{lim}$	Rajoitettu oikosulkuvirta
$R_{lim}$	Laitteen kokonaisresistanssi
$\rho_{SC}$	Suprajohteen resistiivisyys
$\rho_{ST}$	Stabilointimetallin resistiivisyys
$\rho_{SU}$	Substraatin resistiivisyys
$A_{SC}$	Suprajohteen pinta-ala
$A_{ST}$	Stabilointimetallin pinta-ala
$A_{SU}$	Substraatin pinta-ala
$\lambda$	Materiaalin lämmönjohtavuus
$q$	Lämpövirta
$C_p$	Ominaislämpökapasiteetti
$T_{ref}$	Referenssilämpötila
$T$	Lämpötila
$T_C$	Kriittinen lämpötila
$h$	Lämmönsiirtokerroin
$\Delta T$	Lämpötilan muutos
$J_C$	Kriittinen virrantiheys
$E$	Sähkökentän voimakkuus
$w_c$	AC-käämin kierrosmäärä
$l$	Magneettisen polun pituus
$A$	Rautasydämen poikkipinta-ala
$M$	Magnetoituma
$H$	Magneettikenttä
$L$	Induktanssi
$U_e$	AC-käämin jännite
$f$	Taajuus
$B_m$	Magneettivuon tiheyden maksimi
$I_d$	Suprajohtavan käämin läpi kulkeva virta
$I_c$	Suprajohtavan käämin kriittinen virta
<b>IRR</b>	Internal Rate of Return, efektiivinen korko
<b>MARR</b>	Minimum Attractive Rate of Return, pienin hyväksyttävä korko

<b>m</b>	Suprajohteen massa
<b><math>\Delta T_R</math></b>	Lämpötilan muutos suprajohteessa quenchin aikana
<b><math>\Delta t</math></b>	Quenchiin kuluva aika



# 1. JOHDANTO

Sähköverkkojen vikavirtojen rajoittaminen on ajankohtainen ongelma. Sähkön tarve Suomessa on kasvanut viime vuosina, ja iso osa maamme tuotantokapasiteetista on ikääntynyt. Arvioidaan, että seuraavan 10 – 20 vuoden kuluessa merkittävä osa järjestelmistä on teknisen käyttöikänsä lopussa. Uuden tuotannon vaatimuksista on esille nostettu toimitusvarmuus, vähäpäästöisyys ja kilpailukykyinen hinta. Kasvihuonekaasujen vähentäminen kuuluu EU:n päästövähennystavoitteisiin, ja niihin pääseminen edellyttää isoja muutoksia energiatuotantorakenteessa. Uuden tuotannon olisi siis tuotettava sähköä pienemmillä päästöillä ja hyvällä tuotantovarmuudella, mutta silti hyväksyttävään hintaan.

Kysynnän jatkuva kasvu johtaa muun muassa jakeluverkkojen yhdistämiseen ja hajautettujen tuotantolaitosten lisääntymiseen. Tästä johtuen vikavirrat verkoissa ovat nousseet radikaalisti, ja vioista verkolle aiheutuvat kuormitukset johtavat isoihin mekaanisiin, sähköisiin ja termisiin epävakauksiin. Niin vikavirrat kuin verkossa olevien järjestelmien herkkyyksivät vikavirroille ovat kasvaneet. Sähköverkkojen haavoittuvaisuuden on osoittanut suurikokoiset sähkökatkokset, joita on ollut muun muassa Pohjois-Amerikassa ja Italiassa vuonna 2003, Malesiassa vuonna 2005 sekä Brasiliassa ja Paraguayssa vuonna 2009. Katkokset jättivät sähköitä useita kymmeniä miljoonia ihmisiä, ja tämän tyylisten sähkökatkosten kustannukset ovat valtavia. Haavoittuvaisuus, joka yhä useammin johtuu verkkojen alimitoituksesta nykypäivän vaatimuksiin nähden, tulee yhä merkittävämmäksi tulevaisuudessa niin sanotun hajautetun tuotannon lisääntyessä.

Uusiutuvia energianlähteitä hyödyntävän hajautetun energiantuotannon määrä on kasvussa. Tuotannon tuominen lähemmäs käyttäjää tuo myös uusia energiantuotantotapoja, muun muassa tuulivoiman, auringon ja biomassan käyttö sähköntuotannossa lisääntyy. Tuulivoiman määrän kasvu on ollut ehkä kiivainta teknisen kehityksen ja sen ympäristövaikutusten takia. Tuulivoima tuo mukanaan myös haittoja, joita pyritään karsimaan sijoittamalla tuulivoimalat kauas merelle. Näitä kutsutaan offshore-, eli merituulivoimaloiksi. Koska kyseisten voimaloiden sijoituspaikka on vaikeapääsyinen, on varmistettava niiden toiminta kaikissa tilanteissa. Vikavirtojen rajoittamisesta on siis syytä pitää huolta.

Kaikki verkossa toimivat järjestelmät on syytä suunnitella siten, että kuormitukset ovat hallinnassa. Jotta tähän päästään, ja vikoja pystytään vähentämään ja rajoittamaan, on kehitettävä komponentti, joka rajoittaa vikavirtoja tehokkaasti. Suprajohtavat vikavirranrajoittimet (SCFCL) voivat olla ratkaisu ongelmaan. Vikavirranrajoitin on

laite, joka rajoittaa vikavirran halutulle tasolle estäen näin verkossa olevien laitteiden rikkoontumisen häiriötilanteessa.

Diplomityön aiheena on tutkia hajautetun tuotannon osana olevan merituulivoimalan suprajohtavaa vikavirranrajoitinta. Työssä suunnitellaan kaksi eri tekniikkaa ja materiaalia hyödyntävää rajoitinjärjestelmää.

Työ tehtiin suurimmalta osin kirjallisuustutkimuksena, jonka avulla suunniteltiin vikavirranrajoitinjärjestelmät. Aluksi perehdytään hajautettavaan tuotantoon, minkälaisia menetelmiä käyttäjää lähellä olevaan energiantuotantoon voidaan käyttää, ja minkälainen tulevaisuus kyseisellä tuotantomenetelmällä on. Tämän jälkeen, luvussa 3, kerrotaan suprajohtavuuden ilmiöstä ja materiaaleista, sekä siitä, miten suprajohteita voidaan hyödyntää ja on hyödynnetty. Tämän lisäksi tutustutaan vikavirranrajoittimiin ja niiden tekniikoihin. Luvussa 4 syvennyttään virranrajoittimen käyttökohteeseen, eli offshore-tuulivoimalaan ja sen kehitystrendeihin. Tässä luvussa määritellään sekä kyseisen käyttökohteen koko että itse suprajohtavan vikavirranrajoittimen ominaisuudet ja vaatimukset. Määritysten mukaiset SCFCL:t mallinnetaan ja mitoitetaan luvussa 5, jossa myös tutustutaan lähemmin käytettäviin suprajohteisiin ja otetaan selvää markkinoilla olevista materiaaleista. Lisäksi määritellään suunniteltujen laitteiden vaatimat jäähdytykset ja niiden infrastruktuuri. 6. luku perehdyttää SCFCL:n taloudelliseen puoleen kustannus- ja luotettavuusanalyysin avulla. Lopuksi, luvussa 7 tehdään työn tulosten yhteenveto.

## **2. HAJAUTETTU ENERGiantuotanto**

Tässä luvussa pyritään selvittämään mitä hajautetulla energiantuotannolla tarkoitetaan, miten se eroaa perinteisestä energiantuotannosta, tutustutaan tuotantojärjestelmän teknologioihin yleisesti ja selvitetään, mitä ongelmia järjestelmissä esiintyy. Ongelmista tuodaan erityisesti ilmi vikavirrat. Lisäksi kappaleessa tuodaan esille energiantuotannon liiketoimintaa hajautetun tuotannon kannalta.

### **2.1. Energiantuotanto**

Energiantuotanto ja sen kehittäminen on maailmanlaajuinen haaste, joka vaikuttaa jokaisen ihmisen elämään tavalla tai toisella. Energiantarve kasvaa niin teollisuusmaissa kuin kehitysmaissakin väestönkasvun ja teknologisen edistymisen johdosta. Jotta pystytään vastaamaan kasvavaan kulutukseen, on kehitettävä uusia ratkaisuja niin energiantuotantoon kuin sen jakeluunkin.

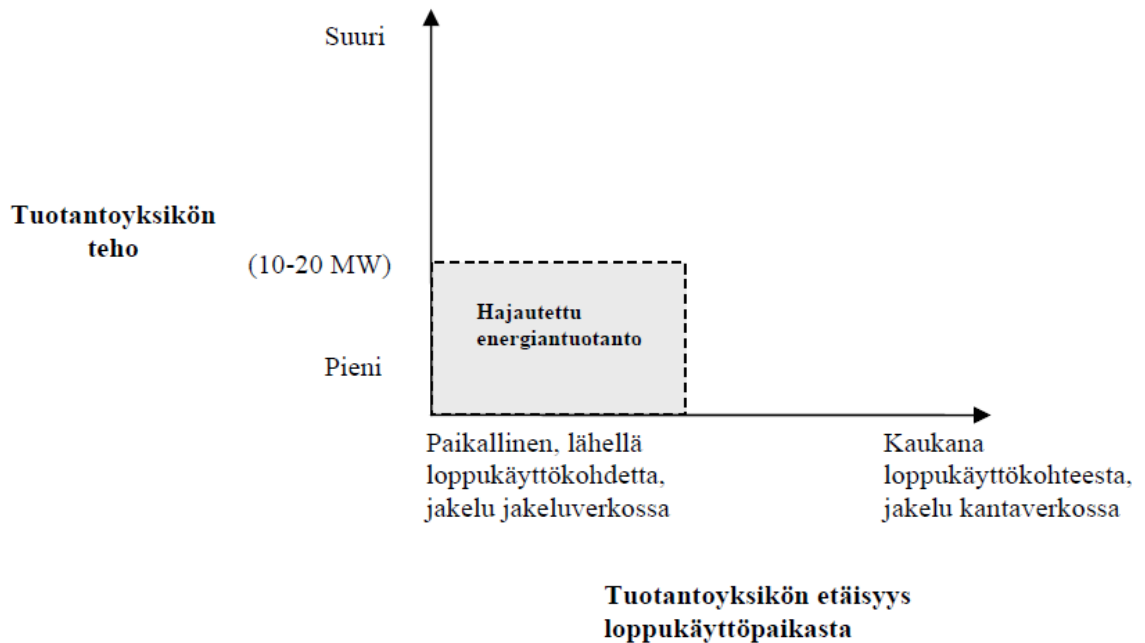
Maailman energiankulutus on ollut jatkuvassa kasvussa aina viime vuoteen saakka, jolloin talouskriisin vaikutukset alkoivat näkyä myös kulutettavan energian määrässä. Ensi kertaa sitten 1940-luvun sähkön kysyntä on vähentynyt maailmanlaajuisesti. Vuonna 2009 ennustetaan pudotusta olevan jopa 3,5 %, ja öljyn kysyntä laski vuoden 2008 viimeisellä vuosineljänneksellä 2,5 %. [1]

Taloustilanne ja kysynnän hiipuminen on jo nyt vaikuttanut suuresti alan investointeihin, muun muassa ratkaisuja uusista tuotantolaitoksista siirretään ja tuotantokuluja leikataan. Kyseisten operaatioiden vaikutuksia tulevaisuuteen voi vain arvailla, mutta tilanteessa voidaan nähdä myös mahdollisuuksia rakenteellisiin muutoksiin, niin energiantuotannon kuin jakeluverkonkin osalta. Käytännössä tämä tarkoittaa panostuksia uusiutuviin energialähteisiin, kuten tuulivoimaan, sähkön ja lämmön yhteistuotantoon ja aurinkoenergiaan sekä, osittain näiden avulla, hajautettuihin, lähellä loppukäyttäjää sijaitseviin energiantuotantolaitoksiin. [2]

Perinteinen energiantuotanto on keskittynyt suuriin laitoksiin, joista energia on siirretty loppukäyttäjän luo laajan sähköverkon avulla. Välimatka tuotantolaitoksen ja käyttäjän välillä voi olla hyvinkin pitkä, mikä vaatii muun muassa verkolta paljon. Verkon kallis ylläpito, epävarmuus ja tehottomuus ovatkin suuria ongelmia jakelussa, ja tästä syystä sitä pidetään sähkönjakelun heikoimpana lenkkinä. Yksi ratkaisu ongelmiin on hajautettu energiantuotanto, joka lyhentää edellä mainittua välimatkaa ja näin vähentää jakeluverkosta syntyviä ongelmia. Lisäksi hajautettu tuotanto vähentäisi siirrettäessä tapahtuvia häviöitä, jotka voivat olla hyvinkin huomattavia.

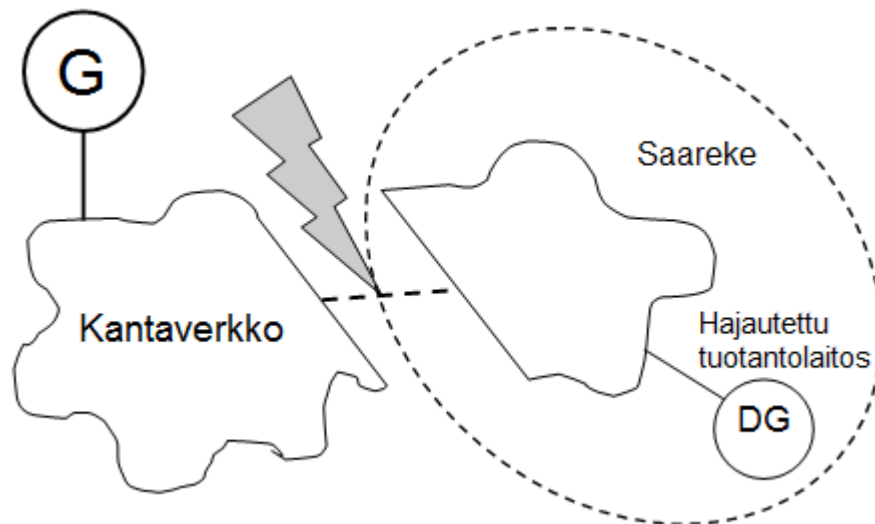
Energiatuotanto voidaan rakenteellisesti jakaa kahteen osaan, keskitettyyn tuotantoon ja hajautettuun tuotantoon. Keskitetyllä energiantuotannolla tarkoitetaan sähköntuotannon tapauksessa suuria, kaukana loppukäyttäjistä sijaitsevia tuotantolaitoksia, joiden tuottama sähkö syötetään valtakunnalliseen kantaverkkoon. Hajautetulla energiantuotannolla tarkoitetaan tuotantoa, jonka energia on suunnattu lähiympäristön käyttöön jakeluverkon kautta, eikä liityntää kantaverkkoon välttämättä tarvita lainkaan. Laitokset ovat teholtaan matalia, ja perusidea tekniikan osalta onkin, että kuka vaan voisi ostaa massatuotantona valmistetun energiantuotantojärjestelmän omaan käyttöönsä.

Hajautetulle energiantuotannolle ei ole mitään yhtenäistä määritelmää. World Alliance of Decentralized Energy (WADE) määrittelee hajautetun energiantuotannon loppukäyttäjän läheisyydessä tapahtuvaksi tuotannoksi riippumatta tuotantoon käytettävästä tekniikasta, sen koosta tai polttoaineesta. Suomessa katsotaan hajautetun energiantuotannon olevan tuotantoa, joka tapahtuu nimellisteholtaan pienimuotoisissa voimaloissa, joissa käytetään uusiutuvia energialähteitä tai jotka käyttävät yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantoa (Combined Heat and Power, CHP). [3]



*Kuva 1: Hajautetun tuotannon määritelmä. [5]*

Hajautettu energiantuotanto sallisi nk. saarekekäytön, mikä tarkoittaa, että jokainen tuotantolaitos toimii täysin omillaan jakelualueellaan muista energiajärjestelmistä riippumatta [4]. Saarekekäyttöön voidaan siirtyä suunnitellusti, jolloin tarkoituksena on hajautetulla tuotannolla tuottaa alueen koko tehontarve. Jos liityntä kantaverkkoon on toteutettu, häiriötilanteissa saarekekäytön avulla voidaan turvata alueen sähkönsaanti, näin vähennetään kuluttajien kokemien sähkökatkokkien määrää eli parantaa jakelun luotettavuutta.



*Kuva 2: Vian tai suunnitellun kytkennän takia syntyvä saareketilanne. Hajautettu tuotantolaitos DG tuottaa saarekkeen tarvitseman tehon.*

Saarekekäytön ongelmana on verkon taajuuden ja jännitteen säilyttäminen kantaverkon mukaisena. Koska jakeluverkon tehotasapainoa ei voida säilyttää, tuotannon ja kulutuksen täytyy olla koko ajan tasapainossa. Vaatimukset tuotannon suojaukselta ja automaatiikalta ovat siis kovat.

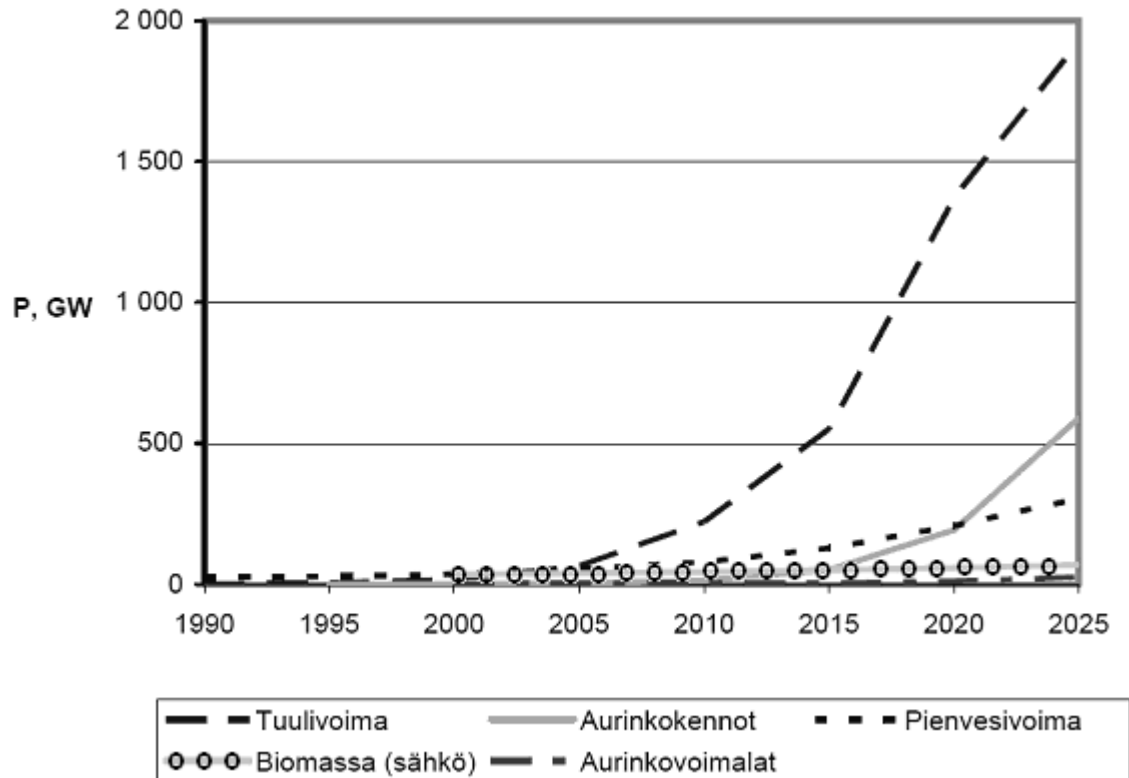
Hajautettu energiantuotanto on nopeasti kasvava energiateknologian ala, markkinat kasvavat Euroopassa 15 % vuodessa ja kehittyvillä alueilla tätäkin nopeammin. Tämän kehityksen kannustimena voidaan pitää sähkön ja lämmön yhteistuotannon kannattavuuden lisääntymistä sekä tekniikan tuomaa paikallisten energiavarojen entistä helpompaa hyödyntämistä. Myös uusiutuvien energialähteiden käytön helpottuminen tekniikan kehittyessä tuo nostetta kysyntään. [5]

Hajautetulla energiantuotannolla on monia etuja keskitettyyn tuotantoon verrattuna. Energia tuotetaan juuri siellä, missä sitä käytetään paikallisista raaka-aineista, joten polttoaineen kuljetusmatkat vähenevät. Tällöin myös ympäristöön kohdistuvat rasitukset pienenevät vähenevien päästöjen muodossa. Samoin lyhenevät energian siirtomatkat, mikä tietää häviöiden pienenemistä, eli hyötysuhteen paranemista, ja edullisempaa hintaa loppukäyttäjälle. Lisäksi hajautettu energiantuotanto tuo kohdealueelleen energiariippumattomuuden kriisien ja muiden onnettomuuksien varalle, jotka keskitetyssä tuotannossa vaikuttaisivat suurella vaikutusalueella(10). Yleisesti hajautetussa energiantuotannossa käytetään erilaisia polttoaineita kuin keskitetyssä tuotannossa, joten energiapaletti laajenee ja näin vähentää riippuvuutta yhdestä jakelukanavasta [6]. Energiantuotantojärjestelmä on myös kooltaan hyvin pieni, joten laitteiston mahdollinen siirto tilanteessa, jossa energian tarve muuttuu, onnistuu helposti [7]. Pieni koko tuo myös pienemmät rakennuskustannukset, helpomman sijoittamisen, lyhemmän rakennusajan ja tätä kautta myös alemman rakentamiskynnyksen[6].

Hajautetun energiantuotannon yleistymisellä on myös haasteita. Eräs niistä on luonnollisesti keskitetyn tuotannon avulla valmistetun energian edullisuus, kustannusten läpikotainen tuntemus ja valmiit, jo käytössä hyväksi havaitut ja toimivat jakelukanavat.

Lisäksi perinteisten energiayhtiöiden muutosvastarinta ja nihkeys uutta tekniikkaa vastaan hidastaa kehitystä. Hajautetussa tuotannossa käytettävät tekniikat, kuten aurinko- ja polttokennot, ovat ainakin vielä monimutkaisempia ja kalliimpia kuin perinteisessä tuotannossa. [7]

Kuvassa 3 nähdään ennuste siitä, miten uusiutuvien energialähteiden tuotantokapasiteetti kehittyy 2025 mennessä. Koska kyseisiä energianlähteitä käytetään lähes kokonaisuudessaan sähköntuotantoon, voidaan kokonaistuotannosta tehdä johtopäätöksiä myös tältä osin. Kuten käyrästä nähdään, tuulivoiman kehityksen arvellaan olevan voimakasta aina 2020-luvulle asti. Myös aurinkokennojen kapasiteetin ennustetaan kasvavan ensi vuosikymmenen aikana voimakkaasti. Vuonna 2004 EREC (European Renewable Energy Council) ennusti, että asennettua kapasiteettia olisi arvion mukaan noin 14 GW vuonna 2010 ja lähes 200 GW vuonna 2020. Tämän jälkeenkin kasvu on arvion mukaan hyvin voimakasta, sillä vuonna 2040 aurinkokennojen yhteenlaskettu teho olisi arvion mukaan yli 6 000 GW. [5] Pienvesivoima on myös tulevaisuudessa jonkinasteinen ratkaisu energian tuotantoon, mutta ennusteesta voimme päätellä, ettei tällä hetkellä sen oleteta nousevan kovin suureen asemaan. Kuvaa tulkittaessa on otettava huomioon eri tuotantotapojen käyttöasteen vaihtelu, mitä suurempi tekniikan käyttöaste on, sitä tehokkaammin energia saadaan talteen. Tuulivoimassa tämä on kolmasosan luokkaa, aurinkokennoilla vain noin 20 %. Biomassalla tapahtuvassa energiantuotannossa voidaan päästä 60-70 % lukuihin. [8]



Kuva 3: Uusiutuvien energialähteiden kehitys [8]

## 2.2. Hajautetun energiantuotannon teknologiat

Hajautetun energiantuotannon järjestelmien idea nykypäivänä perustuu vahvasti uusiutuvia energialähteitä hyödyntäviin teknologioihin, mutta käytössä on luonnollisesti myös perinteistä tekniikkaa. CHP-laitteistot ovat yleisiä tuotannossa, ja niistä lähemmin seuraavaksi.

Tuotannossa käytettävät järjestelmät voidaan luokitella useilla tavoilla, koon, käytettävän polttoaineen tai kuten seuraavassa, käyttötarkoituksen mukaan (Consumer Energy Council of America, CECA):

*Lyhyen käyttöajan laitokset*, joita käytetään varavoiman tuottamiseen. Perinteinen varavoimaa tuottava järjestelmä on maaseuduilla yleinen aggregaatti, joka tuottaa sähköä polttomoottorin avulla käyttäen dieselöljyä tai bensiiniä.

*Kulutushuippujen aikana käytetyt tuotantolaitokset*, useimmiten diesel- tai kaasuturbiinivoimalat, joiden avulla pyritään suurten voimalaitosten kuormituksen pienentämiseen.

*Järjestelmät, joita käytetään, kuten perinteisiä voimalaitoksia*. Käyttöajat ovat pitkiä johtuen suurista investointikustannuksista. Mikro- ja kaasuturbiinit ovat käytetyimpiä tekniikoita. Niiden avulla voidaan teollisuuden prosessin hukkalämpö hyödyntää ja näin nostettua hyötysuhde hyvinkin korkeaksi. Yhdistämällä kaasuturbiini lämmöntalteenottokattilaan, jossa kuumista savukaasuista otetaan lämpöenergiaa, saadaan kokonaishyötysuhde jopa 90 %:iin.[3]

Neljännän ryhmän muodostavat *yhdistetyt sähkön, lämmön ja kylmän tuotantolaitokset*. Muodostuva lämpö käytetään teollisuuden prosesseissa muun muassa höyrynä ja kaukolämmityksessä kiinteistöjen lämmitykseen.

Seuraavaksi tehdään lyhyt katsaus niin uusiutumattomia kuin uusiutuvia energialähteitä käyttäviin hajautetun energiateollisuuden teknologioihin. Energiaa voidaan tuottaa hajautetusti monella eri tekniikalla. Vaikkakin uusiutuvat energialähteet ovat tulevaisuudessa pääosassa tuotannossa, ovat siis varsinkin CHP-tekniikan osalta uusiutumattomia energialähteitä käyttävät tekniikat vielä mukana.

### **Moottorivoimalat ja turbiinit**

Yksi käytetty tekniikka on erilaiset moottorivoimalat. Tyypillinen tämänlainen voimala koostuu mäntämoottorista ja sen yhteyteen kytketystä generaattorista. Polttoaineena käytetään joko kaasua, dieselöljyä tai kaksoispolttomoottoreissa näiden yhdistelmää. Hyötysuhteen nostamiseksi voimalassa hyödynnetään myös syntyvä lämpö CHP-

tekniikan avulla, kaas- ja dieselmoottorien sähköhyötysuhde on koosta riippuen 30-45 % ja kokonaishyötysuhde 75-90 %. [3]

Mikroturbiineilla ei päästä aivan näihin lukemiin, vaikka käytettäisiinkin yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuottoa. Mikroturbiini on pienikokoinen, 25-250 kW:n turbiini, jossa polttoaineena voidaan käyttää maakaasua, vetyä, biokaasua tai biomassaa. Rakenteeltaan mikroturbiini sisältää generaattorin, kompressorin ja turbiinin yhden akselin yhdistämänä.[5]

Myös Stirlingmoottoria voidaan käyttää hajautetussa energiateollisuudessa. Se eroaa otto- ja dieselmoottoreista sylinteritilojensa osalta, sillä toisin kuin mainituissa perinteisissä moottoriteknologioissa, Stirlingmoottorin sylinteritila on suljettu ja palaminen tapahtuu kokonaan sen ulkopuolella, ja mäntä liikkuu tilan paineenvaihtelun ansiosta lämpötilan mukaan. Koska palaminen tapahtuu kokonaan moottorin ulkopuolella, voidaan polttoaineena käyttää laajaa valikoimaa eri aineita, kuten maakaasu, öljy ja puu. Stirlingmoottorilla voi olla tulevaisuudessa enemmänkin markkinoita, sillä edellä mainittujen perinteisten polttoaineiden lisäksi lämmitykseen voidaan käyttää muun muassa auringonvaloa. Hyötysuhdetta voidaan parantaa käyttämällä hyödyksi myös hukkalämpö. [5, 8]

Höyryturbiinit ovat tuttuja keskitetyn energiatuotannon puolelta, sillä suuri osa tuotetusta sähköstä tuotetaan juuri erilaisten höyrykäyttöisten turbiinien voimalla. Hajautetussa energiantuotannossa turbiinit ovat pienikokoisempia, mutta periaate on sama. Korkeapaineinen höyry ja sen lämpöenergia muutetaan liike-energiaksi jota käytetään generaattorin pyörittämiseen. Höyryn tuottamiseen käytetään kattilaa, jossa polttoaineena on esim. biomassa, hiili, öljy tai maakaasu.[5]

### **Polttokennot**

Polttokennoilla tuotetaan energiaa, siis sähköä ja lämpöä, kemiallisen reaktion kautta. Polttoaineena laitteissa käytetään joko vetyä, jota tuotetaan reformoimalla muun muassa maakaasusta, tai muita kaasuja. Päästönä kenno tuottaa vettä ja happea, jos polttoaine on puhdasta vetyä. Muita polttoaineita käytettäessä syntyy myös hiilidioksidia, mutta tavanomaisia energiatuotantotekniikoita parempi hyötysuhde johtaa siihen, että päästöt ovat energiayksikköä kohden pienemmät. Teoreettinen maksimihyötysuhde vety-happi-polttokennolla on standardiolosuhteissa 82,5 % [8]. Todellinen hyötysuhde on noin 50 %.

### **Vesivoima**

Vesivoima on myös tärkeä osa, kun mietitään erilaisia hajautetun energiatuotannon teknologioita. Se on uusiutuva ja luonnonmukainen ja ennen kaikkea saasteeton tapa tuottaa energiaa. Suomessa vesivoimaa tuotetaan suurilta osin Pohjois-Suomen joista säätövoimaksi muiden energiatuotantotapojen rinnalla. Hajautettuun energiatuotantoon sopivat pien- ja minivesivoimalat eivät ole uusi keksintö, sillä jo viime vuosisadan



alussa sähköntuotannon alkutaipaleella vesivoima oli usein tärkeä tekijä eri teollisuuden haarojen tarpeen tyydyttäjänä. Asutuskeskuksen lähetyvillä oleva joki tuotti näin sähköä alueen teollisuudelle ja asukkaille, aivan kuten nykyisessä hajautetun energiatuotannon johtoajatuksessa. Pienvesivoimalalla käsitetään alle 10 MW:n voimaloita. Nykyisellään maailmassa tuotetaan pienvesivoimalla noin 50 GW, ja vuositasolla kasvua oletetaan olevan 10 %:n luokkaa [9]. Suomessa koko vesivoimatuotannon nimellisteho oli vuonna 2004 noin 3000 MW:n tasolla [2]. Lähes kaksi kolmasosaa vesivoimasta on otettu energiatuotantokäyttöön ja pääosa rakentamattomista koskista on suojeltu lailla. Vuonna 2020 maailmalla tuotetun energian määrän oletetaan olevan jo 200 GW. [5]

### **Aurinkoenergia**

Auringon maahan kohdistama säteilyteho on yli 10000-kertainen suhteutettuna energian kokonaiskäyttöön maailmassa. Energiaa voidaan hyödyntää aurinkokennoilla tai termisillä aurinkovoimaloilla, näistä kennot ovat kokoluokaltaan pienempiä, hyvin esimerkiksi yksityiskäyttöön soveltuvia, kun taas termiset voimalaitokset ovat yleensä suuria ja tehokkaita [5].

Kuten jo edellä todettiin, aurinkoenergian hyödyntäminen on suuressa kasvussa, ja muutaman kymmenen vuoden sisällä tuotetun sähkön määrä kohoaa jo useaan tuhanteen gigawattiin. Aurinkoenergian hyödyntämiseen käytetyn tekniikan hyötysuhteet ovat vielä tällä hetkellä matalat, amorfiset kennot pääsevät noin 4-7 %, kun kidepiipaneelien hyötysuhde on noin 10-12 %. Lisäksi hyötysuhteeseen vaikuttavat kennoihin liitettävä elektroniikka, kuten invertterit, ja ulkoiset olosuhteet, esimerkiksi korkeilla lämpötiloilla hyötysuhde laskee. Auringon lämpöä hyödyntävien lämmönkeräysjärjestelmien kohdalla hyötysuhteeseen vaikuttaa myös lämpötila, mitä viileämpi ympäröivä ilma on, sitä parempi hyötysuhde. Järjestelmien kokonaishyötysuhde on noin 30-40 %, mutta sitä voidaan edelleen parantaa erilaisilla tehokkaammilla pinnoitteilla, jotka keräävät hyvin auringon lämpösäteilyä. [3]

### **Lämpöpumput**

Hajautettujen energiantuotantojen tekniikoilta haetaan varmaa ja tasaista toimintaa ympäri vuoden ja riippumattomuutta säätilasta tai vuorokauden ajasta. Lämpöpumppu on tekniikka, joka käyttää lämmöntuottoon maaperää, tuomalla maan sisästä energiaa ja siirtämällä sen väliaineeseen. Väliaine höyrystyy tuodun lämmön avulla, jonka jälkeen sen painetta nostetaan. Samalla höyryn lämpötila nousee ja väliaine lauhtuu [3]. Maan sisässä oleva geoterminen lämpö syntyy radioaktiivisen aineiden hajoamisprosessin seurauksena, mutta se luetaan silti uusiutuvien energialähteiden joukkoon, sillä katsotaan, ettei käytön takia kyseisen lämpövaraston lämpötila laske [8]. Maaperään asetetaan putkisto, joko vaakatasoon maanpinnan alle, poraamalla kallioon, käyttämällä porakaivoja putkituksen asennukseen tai vesistöjä hyödyntäen laskemalla

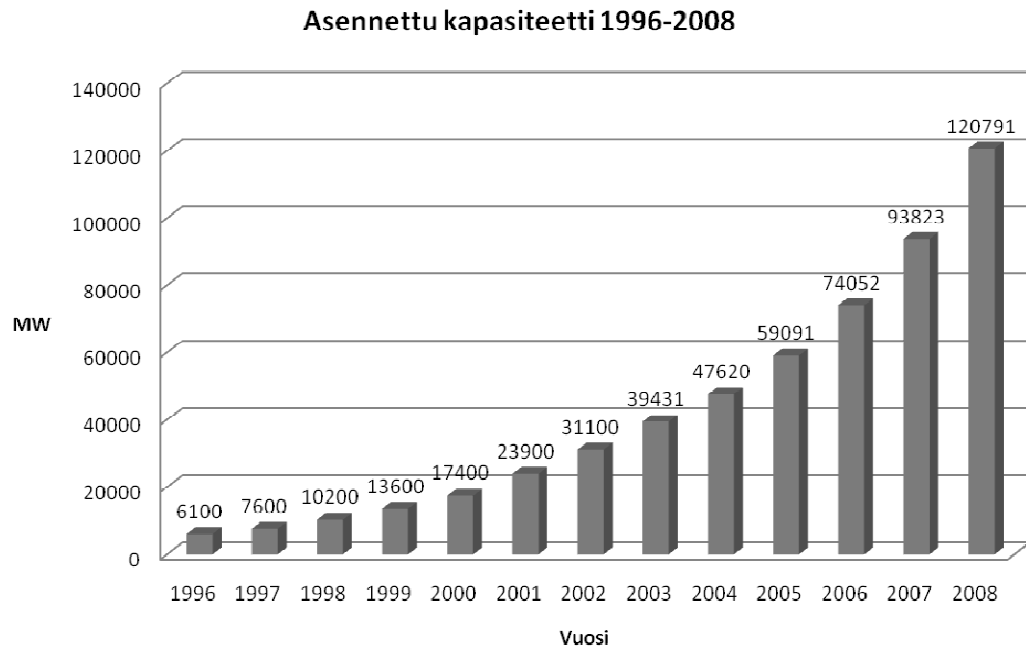
lämmönkeruuputkisto sen pohjalle. Yleensä pumpun teho ei yksinään riitä lämmittämään koko kohdetta, vaan lisälämmönlähde on tarpeellinen. Lämpöpumppua käytetäänkin lähinnä pienentämään perinteisen lämmityksen, kuten sähkö ja öljy, aiheuttamia energiakustannuksia. Lämpöpumppuja käytetään vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän lämmönlähteenä omakotitaloissa, jätevedenpuhdistamoissa, lämpökeskuksissa ja teollisuudessa eri tavoilla, kuten puutavaran kuivauksessa [3].

### **Biomassakattilat**

Energiantuotannossa biomassalla tarkoitetaan etupäässä kaikenlaisia eloperäisiä jätteitä, kuten hakkuujätteitä, puuta sekä sokeria ja tärkkelystä sisältäviä kasveja. Näiden sisältämän energian hyödyntämisessä yleisin tapa on polttaminen. Siinä vapautuva energia voidaan käyttää sähkönä tai lämpönä eri tekniikoita hyödyntäen. Näiden yhteistuotanto on hyvin yleistä. Pienissä biomassaa hyödyntävissä tuotantolaitoksissa käytetään yleensä arinapolttoa, jossa teknisiä ratkaisuja on monenlaisia riippuen juuri polttoaineesta ja voimalan nimellistehosta [5]. Yleisemmät polttoaineet ovat hakkuutähteet, turve, kierrätyspolttoaineet, hake ja puunjalostusteollisuuden jätteet, kuten puun kuori, sahanpuru, kutterilastu, pelletit ja briketit. Hyötysuhteeltaan biomassaa hyödyntävät polttolaitokset pääsevät jopa 70-90 %:iin.[3]

### **Tuulivoima**

Tuulivoima soveltuu hajautettuun energiantuotantoon, ja sen suosio myös isommassa mittakaavassa kasvaa koko ajan. Vuonna 2008 tuulivoiman maailmanlaajuinen kapasiteetti oli jo yli 120000 MW. Kuvasta 4 näemme maailmalle asennetun tuulivoimalakapasiteetin kehityksen vuosien 1996 ja 2008 aikana.



*Kuva 4: Tuulivoiman asennettu kapasiteetti maailmassa (tiedot: Global Wind Energy Council)*

Nykyään kookkaimmat tuulivoimalat ovat nimellisteholtaan jo 5 MW [5]. Hajautetun energiatuotannon piirissä tuulivoimalat voivat olla joko suuria, esimerkiksi koko kylän energiatarpeen täyttämiseen käytettyjä voimalaita, tai pientuulivoimalaita, jotka on tarkoitettu yksittäisen kohteen, kuten omakotitalon, kesämökin tai veneen tarpeisiin. Suomessa tuulivoimaa on rakennettu lähinnä läntiselle rannikolle ja siellä se on yleensä kytketty keskijänniteverkkoon.

Tuulivoima on investointikeskeinen energiantuottomuoto, eli pääosa tarvittavasta rahasta menee suunnitteluun sekä laitteiden ja infrastruktuurin rakentamiseen. Käyttökustannukset jäävät muutamaan prosenttiin kokonaiskustannuksista. Energian, joka on varastoitunut tuuleen, on laskettu olevan moninkertainen verrattuna koko maailman sähköenergiantarpeeseen. Ongelmaksi sen tekee tuulen vaikutusalueen suuruus sekä epäsäännöllisyys. Tämän takia hyödynnettävissä olevasta energiasta käytetään sähköntuotantoon vain pieni osa. Tuulivoimalan hyötysuhde on suhteellisen matala, maksimissaan noin 30 %:n tasolla. Tämä onkin iso haaste tuulivoimaloiden kehityksessä, jotta teknologia voi nousta todella haastamaan perinteisempiä energiatuotantomenetelmiä. Taulukkoon 1 on koottu hajautetussa energiantuotannossa käytettyjen teknologioiden avainlukuja ja tärkeimpiä ominaisuuksia. [3]

Taulukko 1: Hajautetun energiatuotannon menetelmien ominaisuuksia[3]

	<i>Yksikkö- teho (kW)</i>	<i>Sähkö- hyöty- suhde (%)</i>	<i>Lämpö- hyöty- suhde (%)</i>	<i>Käyttö- ikä (a)</i>	<i>Huipun- käyttö- aika (h)</i>	<i>Investointi (euro/kW)</i>	<i>Tuotanto- kustannus (c/kWh)</i>
Tuulivoima	0,1-2500	40-50	-	20	2500	900-1100	4-5
Pien- ja minivesivoima	20- 10000	80-85	-	30	4000	1200-2000	2,5-4
Aurinkosähkö	0,004- 0,1	4-12	-	25	1000	6500- 10000	45-70
Aurinkolämpö	0,3-0,8	-	30-40	20	1000	800-1600	7-14
Lämpöpumput	4-45	-	60-75	20	3000	900-1800	4-8
Biomassakattilat	10- 10000	-	70-90	20	1000/3500	100-200	1-5
Kaasu- ja dieselmoottorit	3-10000	30-45	45-50	15	5000	450-1400	2,5-4
Mikroturbiinit	25-250	15-35	50-60	15	5000	1000-1700	3-4
Stirling- moottorit	0,5-25	15-35	50-60	15	5000	1400-2200	4-5
Polttokennot	0,5-2000	38-55	30-45	15	5000	2800-4400	5-8
Höyrykoneet ja -turbiinit	0,5- 10000	15-35	40-70	15	5000	1500-3000	3-4

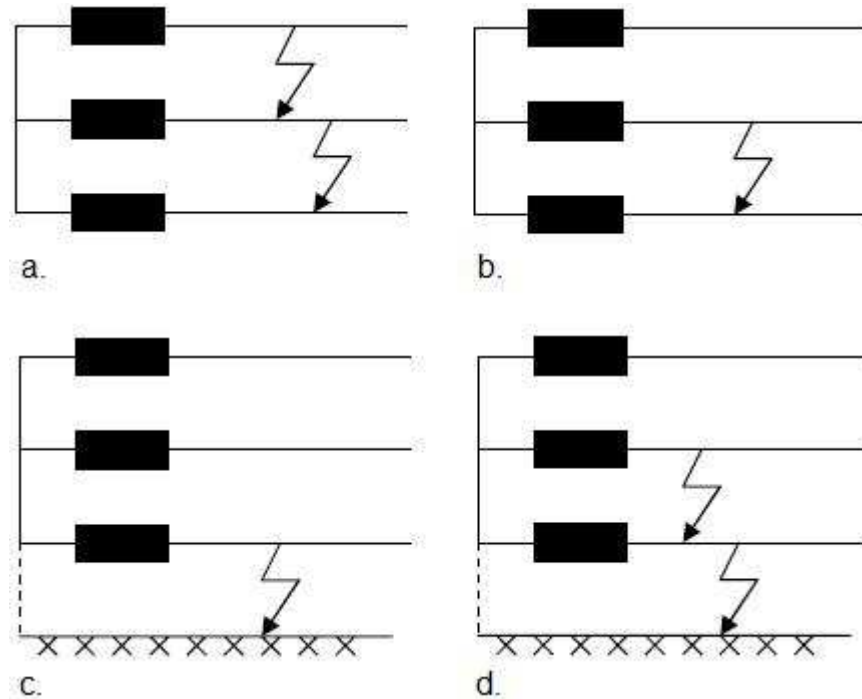
Taulukossa on tarkasteltu pienikokoisia, alle 10 MW:n laitoksia. Luvuista voidaan nähdä, että potentiaalisia tekniikoita on ja niitä kehittämällä voidaan tuotantoa parantaa.

### 2.3. Vikavirrat ja hajautetun tuotannon aiheuttamat ongelmat

Kulutuksen kovan kasvun takia sähköverkkojen kuormitus on lisääntynyt ja tämän myötä myös vikavirrat. Vikavirtana pidetään verkon normaalia kuormitusvirtaa isompaa virtaa, joka syntyy esimerkiksi oikosulun tai jonkin ulkoisen tapahtuman, kuten salaman takia. Tavanomainen oikosulun aiheuttaja on verkossa tapahtuva vaurio, kuten eristeen rikkoontuminen. Kun vikatilanne sattuu, mukana on päämuuntajan takana oleva ylempi jännitetaso ja jokainen verkossa oleva hajautettu energiatuotantojärjestelmä.

Sähköverkossa yleisempiä vikoja ovat kolmivaiheinen oikosulku, kaksivaiheinen oikosulku, maasulku, kaksivaiheinen maasulku, katkennut johdin ja katkenneen johtimen maasulku. Suurimmat vikavirrat aiheutuvat kolmivaiheisesta oikosulusta, joten oikosulkukestoisuudesta aiheutuvia ongelmia käsiteltäessä ne ovat tärkeimpiä. Suojausta ja sen nopeutta tarkasteltaessa huomionarvoisia ovat kaksivaiheinen oikosulku ja maasulku, jotka ovat pienempiä vikavirroiltaan. Riippuen vian sijainnista

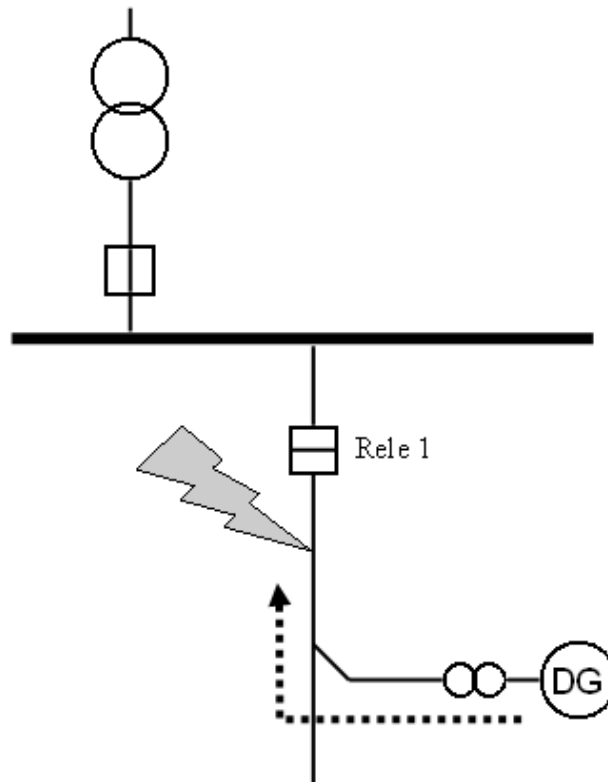
ne voidaan jakaa eri kriittisyystasoihin. Jos vikavirta vaikuttaa lähdön alkupäähän, on oikosulkukestoisuus tärkein verkon ominaisuus, kun taas lähdön lopussa tapahtuva vika on kriittinen suojauksen havahtumisen kannalta. Kuvassa 5 on esitetty muutamia sähköverkossa tapahtuvia vikavirtoja. [10, 11]



Kuva 5: a. kolmenvaiheinen oikosulku, b. kaksivaiheinen oikosulku, c. maasulku, d. kaksivaiheinen maasulku.[11]

Hajautetun energiantuotannon kytkeminen siirtoverkkoon tuo uusia, tavanomaisesta poikkeavia ongelmia ja muutoksia sähköjakeluun. Oikosulkuvirrat muuttuvat, tuotantolaitoksen liitäntäpisteen jännitetasot muuttuvat, saarekekäyttö mahdollistuu, uudenlaisia tai voimistuneita häiriöitä syntyy ja maasulkusuojaus ei ole enää yhtä helppoa kuin keskitettyjä ratkaisuja käytettäessä. Lisäksi vikavirrat voivat kulkea verkossa myös sähköasemaa kohti, ja suojauksen pitää toimia myös siinä tilanteessa, että hajautettu laitos on kytketty irti verkosta. Näiden muutosten takia verkon suojaukseen pitää kehittää uusia ratkaisuja jotta jakelun voidaan taata jatkuvan tehokkaana loppukäyttäjälle saakka.[12]

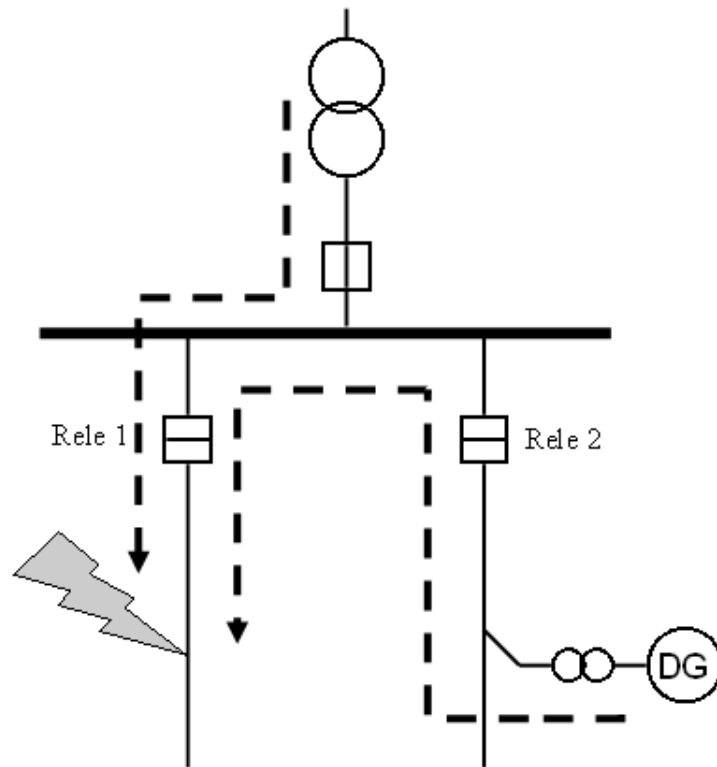
Jälleenkytkennät ovat yleinen suojaustapa verkon eri vikojen korjauksessa. Suuri osa, 70-90 % kaikista vikatilanteista voidaan selvittää juuri jälleenkytkentöjen avulla [13]. Hajautettu tuotanto tuo mukanaan muun muassa jälleenkytkennän epäonnistumisen. Vian sattuessa verkon automatiikka pyrkii suorittamaan jälleenkytkennän.



*Kuva 6: Epäonnistunut jälleenkytkentä. Rele 1 toimii ja katkaisija irrottaa vikapisteen verkosta. Hajautettu voimala syöttää vikapaikkaan yhä virtaa. [15]*

Koska samassa verkossa on myös hajautettu energiantuotantolaitos, vikapaikkaan syötetään yhä virtaa. Tällöin on mahdollista, että laitoksen syöttämä virta on riittävä ylläpitämään valokaarta, ja jälleenkytkentä epäonnistuu. Koska syötetty virta on pieni, ei keskitetyn voimalan ylivirtasuojaus kaikissa tapauksissa havaitse lainkaan ongelmaa, ja vikaa ei näin saada korjattua. Jotta korjaus onnistuisi jälleenkytkennän avulla, eikä kytkennän jälkeen palaava jännite aiheuta pahoja vaurioita hajautetussa energiantuotantolaitoksessa, eritoten sen voimansiirto-osissa, pitää laitoksen olla irti verkosta jälleenkytkennän ajan. Jos jälleenkytkentä onnistuu, voidaan laitos kytkeä tahdistettuna takaisin verkkoon. [11, 14]

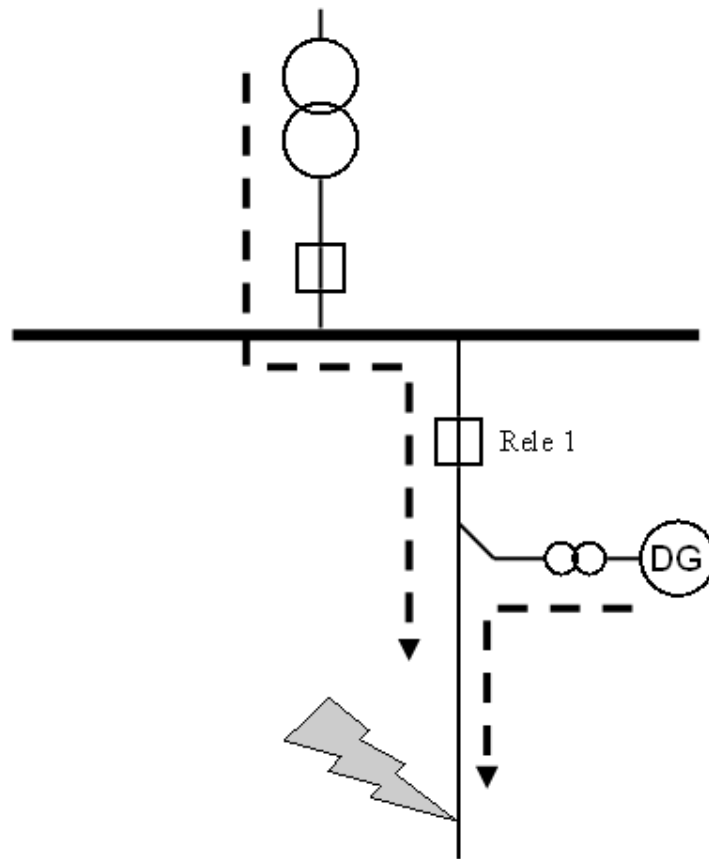
Myös terveen johtolähdön erotus tarpeettomasti verkosta (sympathetic tripping) on yksi ongelma, joka aiheutuu hajautetusta tuotannosta. Tämä aiheutuu viereisen lähdön vikaantumisesta, jolloin hajautettu tuotantolaitos syöttää sille vikavirtaa sähköaseman tai kiskon kautta. Tällöin terveen lähdön releen asetteluarvot saattavat ylittyä ja rele antaa avauskäskyn katkaisijalle. Ongelmia tämä aiheuttaa terveen johtolähdön varassa oleville asiakkaille, jotka jäävät ilman sähköä, vaikka vikaa ei ole. Kuten edellä mainittiin, kolmivaiheisessa oikosulussa virrat ovat suuret, joten ne ovat pahimmat tarpeettoman erottamisen aiheuttajat.



*Kuva 7: Terveen johtolähdön tarpeeton erottaminen. Hajautettu tuotanto syöttää vikapaikkaan vikavirtaa, joka ylittää suojauksen (Rele 2) asetteluarvon ja joka näin irrottaa terveen lähdön verkosta. [15]*

Ongelman korjaus onnistuu esimerkiksi muuttamalla suojauksen aika-asettelua lähdössä, jossa hajautettu tuotantolaitos sijaitsee. Kun kyseistä suojausta muutetaan muita lähtöjä hitaammaksi, ehtivät vian tapahtuessa vikaantuneen lähdön suojaus toimia ennen terveen lähdön suojausta. Tämä voi kuitenkin tuoda ongelmia kyseiseen lähtöön, ja onkin otettava selvää muutoksen seuraamuksista. Rajoitteita tälle voivat aiheuttaa ohuiden johto-osuuksien oikosulkukestoisuus ja itse voimalan stabiilisuus, sillä voimalan on siedettävä vikaantuneen lähdön ylivirtareleen aikahidastuksen pituinen oikosulku hukkaamatta stabiilisuuttaan.

Hajautetun tuotannon liittäminen kauas sähköasemasta voi aiheuttaa ongelmia lähdön ylivirtasuojauksen toimintaan. Tällaisessa tilanteessa, jos vika sattuu lähdössä lähellä hajautetun tuotannon voimalaa, joko ennen tai jälkeen, on oikosulkuimpedanssi mahdollisesti merkittävästi pienempi voimalan ja vian välillä kuin sähköaseman ja vian välillä. Tämän seurauksena voimala syöttää vikavirtaa vikapaikkaan, ja sähköaseman syöttämä vikavirta pienenee niin paljon, ettei suojaus enää toimi suunnitellulla tavalla. Tällöin vikavirta voi vahingoittaa verkon rakenteita. Suuriresistanssiset ja kaksivaiheiset viat ovat erityisen ongelmallisia, jos ne sijaitsevat lähdön lopussa. Niiden aiheuttamat viat voivat tehdä paljon tuhoa ennen havaitsemista.



*Kuva 8: Lähden ylivirtasuojauksen toiminnan estäminen. Hajautettu tuotanto pienentää sähköaseman syöttämää vikavirtaa estäen tai hidastaen suojauksen toimintaa. [15]*

Jotta edellä todetuista suojausongelmista päästäisiin eroon, on panostettava hajautettujen tuotantolaitosten omaan suojaukseen. Sen on toimittava nopeammin kuin muun verkon suojaus ja näin erotettava voimala verkosta ensimmäisenä. Tämä tapa kuitenkin hidastaa vian korjausta luonnollisesti siitä syystä, että tapahtumia vian tapahtumisesta sen poiskytkentään on normaalia enemmän. Kokonaan ongelmasta päästäisiin, jos hajautettu tuotantolaitos olisi kytketty kokonaan omalla lähdöllään sähköasemaan. [15]

Verkko pitää suojata myös maasulkujen aiheuttamilta vioilta. Jakeluverkko on maasta erotettu ja liitetty kolmio-tähti-kytketyn muuntajan avulla. Verkkoon syntyy tällöin epäsymmetria. [15] Virrat eivät kohoa kovin suuriksi, noin 1-200 A, eli oikosulkuvirtoja huomattavasti pienemmiksi. Jos tuotantolaitos jää syöttämään verkkoa yksinään, eli epätoivottuun saareketilanteeseen, se voi ylläpitää jännitteen ja näin mahdollistaa maasulkuvirran kulkemisen verkossa. Tällaisessa tilanteessa myös maasulun paikannus on vaikeaa. [11]

Epätoivotun saareketilanteen havaitseminen on hajautetun energiatuotannon suojauksen tärkeimpiä avoimia kysymyksiä tällä hetkellä. Saareketilanne tarkoittaa tilannetta, jolloin voimala yksinään syöttää verkon osaa ja pitää sen näin jännitteisenä. Jos laitosta ei ole suunniteltu tällaista käyttöä varten, erinäisiä ongelmia saattaa syntyä. Voimala ei pysty tuottamaan tarpeeksi laadukasta jännitettä verkon vaikutusalueella oleville

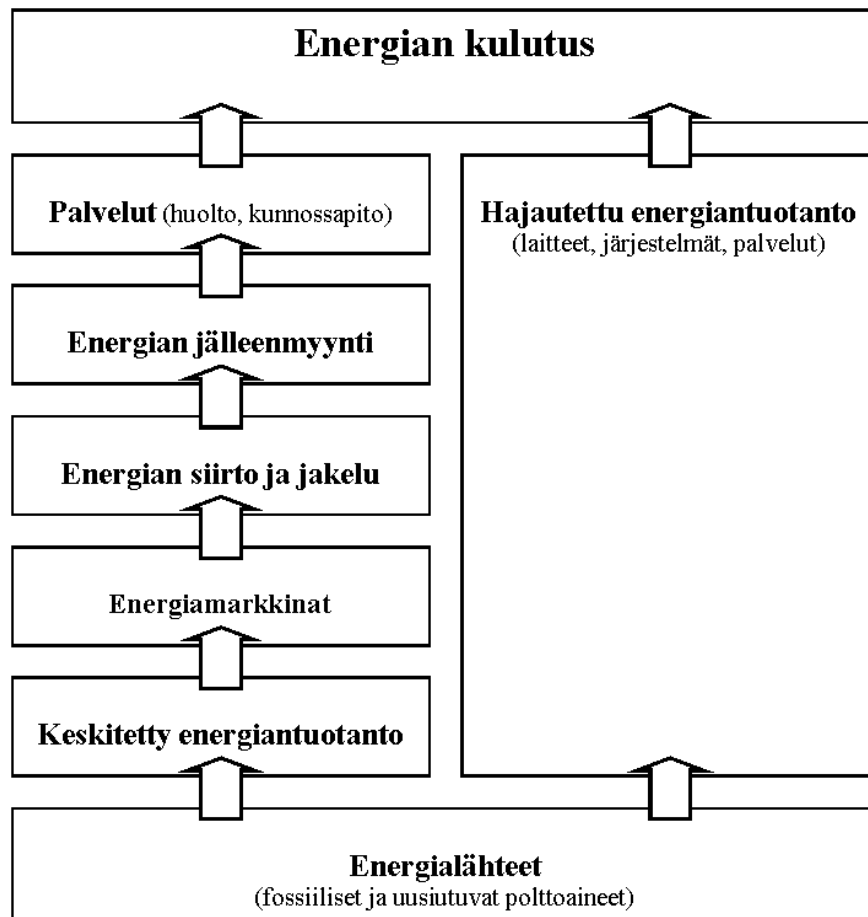


käyttäjille ja pika- ja aikakytkennät epäonnistuvat. Jännitteen pysyminen verkossa vikatilanteessa aiheuttaa vaaran sitä korjaamaan tulleele huoltohenkilökunnalle, joka ei välttämättä tiedä tilanteesta. Lisäksi verkon korjauksen jälkeen tapahtuu tahdistamaton kytkeä, mikä taas rasittaa verkkoa ja voimalaa.

Näiden syiden takia onkin tärkeää tunnistaa saareketilanne ja irrottaa hajautetun energian tuotantolaitos mahdollisimman nopeasti verkosta. Tämä tapahtuu mittaamalla verkon jännitettä ja taajuutta tarkoitukseen soveltuvilla releillä, tai taajuuden muutoksen nopeutta tarkastelevalla ROCOF (Rate of Change of Frequency) -menetelmällä, joka on aiemmin mainittuja tapoja tarkempi. Saareketilanteen havainnointiin käytetään myös ns. aktiivisia menetelmiä, joissa verkkoon syötetään pieniä muutoksia ja mitataan näiden aiheuttamaa vastetta. Yksi varteenotettava menetelmä saareketilanteiden havainnointiin on myös tiedonsiirtoon perustuva laukaisu. Siinä hajautettu tuotantolaitos irrotetaan verkosta toisten suojalaitteiden reagoitua. [15]

## **2.4. Liiketoiminta**

Hajautettu energiantuotanto muuttaa nykyistä tuotannon liiketoimintamallia merkittävästi. Tuotannon aloittaminen ei vaadi nykyisen kaltaisia mittavia investointeja, vaan järjestelmät voidaan toimittaa täydellisinä kokonaisuuksina haluttuun tuotantopaikkaan mahdollisimman lähelle loppukäyttäjää. Jo pelkästään tämä muuttaa tuotannon arvoketjua, sillä toisin kuin aikaisemmin, paikallinen tuottaja hallinnoisi ja olisi vastuussa koko ketjun loppupäästä polttoaineen hankinnasta eteenpäin. Tällöin siis energian käyttäjä ostaisi energiansa paikalliselta tuottajalta, jolloin nykyinen siirtomaksujärjestelmä kokisi jonkinlaisen muutoksen siirtomatkojen lyhentyessä merkittävästi. Energian hinta koostuisi näin siis mahdollisesta polttoaineen hankintahinnasta ja järjestelmän ylläpitokustannuksista.



*Kuva 9: Keskitetyn ja hajautetun energiantuotannon arvoketjujen vertailu. Toimijoiden määrä vähenee, siirron kustannukset vähenevät.[5]*

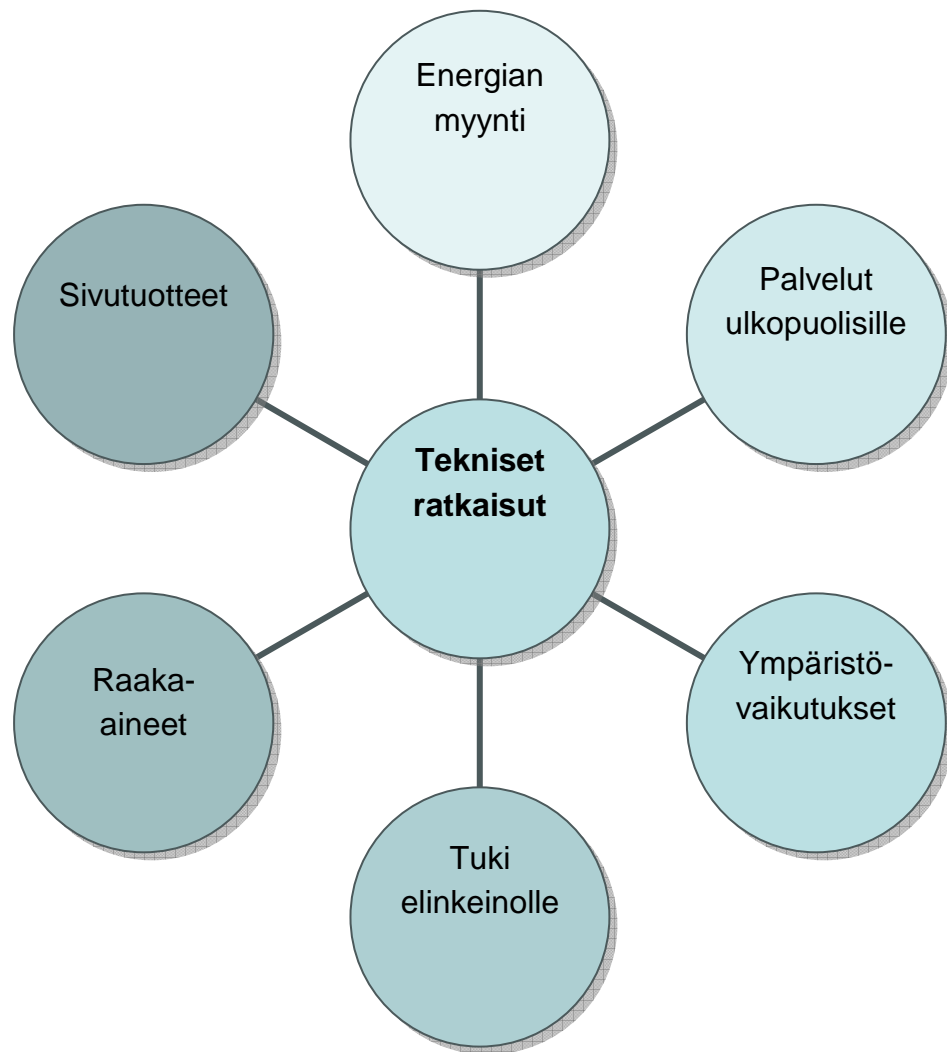
Paikallinen tuottaja voi olla myös itse loppukäyttäjä, kuten biomassaa hyödyntävä maatila, joka tuottaa energiaa oman tarpeensa lisäksi mahdollisesti myös ympäröiville asiakkaille. Esimerkkejä tällaisesta toiminnasta on muun muassa Tanskassa, jossa laitosten rakentamista on tuettu valtion toimesta. Suomessa maatalan yhteydessä olevia biokaasua tuottavia ja hyödyntäviä järjestelmiä on kymmenkunta, mutta uusia on suunnitteilla. Järjestelyssä yhden tai useamman maatalan tuottamat lietelannat, peltokasvit ja muut orgaaniset materiaalit käytetään tuotantolaitoksessa biokaasun valmistukseen. Tuotettu energia käytetään paikallisesti tuotannossa mukana olevilla maataloilla ja lopputuotteena syntyvä käsitelty jäte käytetään lannoitukseen tilojen pelloilla. [16]

Edellä esitetyn kaltainen yksittäinen uusiutuvia energialähteitä, kuten lähiympäristön jätteitä, tuulivoimaa tai aurinkoa hyväksikäyttävä energiantuotantolaitos voidaan toteuttaa siten, että se on taloudellisesti kannattava ja järkevä. Jotta tähän päästään, pitää konseptiin liittää muutakin kuin pelkästään energiantuotanto. Näin pystytään mahdollisesti hyödyttämään koko ympäröivän alueen taloutta. Läheisesti hajautettuun energiantuotantoon liittyy monia liiketoimintamuotoja, kuten polttoaineen toimittaja. Laitostoimittaja taas on taho, joka toimittaa itse energiantuotantojärjestelmän.

Järjestelmän tyyppi vaihtelee käyttökohteen ja käytettävän polttoaineen mukaan, mutta kuten edellä todettua, hajautetussa energiatuotannossa pyritään tuotantolaitosten samankaltaisuuteen, jopa massatuotantotuotteeseen, jotta valmistuskustannukset pysyvät kurissa. Komponenttitoimittaja toimittaa järjestelmässä tarvittavat osat joko kunnossapitopalveluiden tai laitostoitimittajien pyynnöstä. Kunnossapitopalvelut ovat erittäin tärkeitä, ja ovat avainasemassa puhuttaessa koko järjestelmän luotettavuudesta, ja verkkoyhtiön palveluja tarvitaan jakeluverkon rakentamiseen ja ylläpitoon, eli hajautetun energiantuotannon tapauksessa verkkoliittynän toteuttamiseen. Järjestelmässä käytettävät automaatio- ja tietojärjestelmäpalvelut tehostavat hajautetun energiatuotannon arvoketjua merkittävästi.

Energian tuottaja tuottaa polttoaineen toimittajalta ostamansa polttoaineen tai muun energian sähköksi tai lämmöksi ja myy sitä eteenpäin joko välittäjälle tai suoraan loppukäyttäjälle. Energian myyjä toimii välittäjänä, eli ostaa tuottajilta energiaa ja myy sen eteenpäin loppukäyttäjälle. Rahoittajalla on hyvinkin tärkeä rooli, ja sen vaikutukset ovat mittavat jokaiseen osatekijään. Vakaa rahoituskanava tarvitaan, jotta tuotantoa pystytään kehittämään pitkäjänteisesti ja mahdollisimman pienillä riskeillä. Lisäksi tuotantoon liittyy useita muita liiketoimintamuotoja ja palveluita, kuten konsultointi- ja projektinhallintatehtävät. [17]

Kuvaan 10 on koottu muutamia alueellisen talouden sisällään pitämiä taloudellisia osatekijöitä, jotka on otettava huomioon hajautettua tuotantoa suunniteltaessa. Tarvittavat tekniset ratkaisut on mietittävä tarkoin eri osatekijät huomioon ottaen. Tuotannossa käytettävät raaka-aineet, siitä syntyvät ympäristövaikutukset, sivutuotteet ja palvelut ovat tärkeitä myös teknisen ratkaisun kannalta. Ei myöskään pidä unohtaa talouden kannalta elintärkeitä tukia, jotka voivat vaihdella suuresti eri tekniikoiden välillä. Kentän täydentävät tuotannon lopputuotteista rakentuvat osatekijät, eli tuotetun energian myynti ja syntyvät palvelut ulkopuolisille.



*Kuva 10: Energiantuotantoyksikön liiketoimintakonsepti koostuu monesta osatekijästä, joista taloudellinen kokonaisratkaisu on koottava [17].*

Kuten edellä todettiin, pyrittäessä edistämään hajautetun tuotannon laajempaa käyttöönottoa, on tällä hetkellä tarpeellista maksaa tuottajille rahallista tukea, jotta järjestelmien rakentamisesta ja ylläpidosta saadaan houkuttelevampaa. Jo nykyisellään uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön edistäminen Suomessa pohjautuu harkinnanvaraisiin investointitukiin ja verotukiin. Jos Suomi aikoo päästä esimerkiksi tuulivoiman hyödyntämisen osalta tavoitteisiinsa, jotka on asetettu vuoden 2008 ilmasto- ja energiastrategiassa, toteuttaminen edellyttää ohjauskeinojen tehostamista ja rakenteiden kehittämistä. Suomi on yksi harvoista EU:n jäsenmaista, joissa ei vielä ole käytössä syöttötariffeihin tai vihreisiin sertifikaatteihin perustuvia järjestelmiä. [18]

Nykyisellään tukipolitiikka kannustaa bioenergian, kuten turpeen, käyttöön hajautetussa energiantuotannossa, ja markkinat odottavat muutoksia. Monissa EU:n jäsenvaltioissa on voimassa uusiutuvan energian takuuhintajärjestelmiä, eli syöttötariffeja, joiden määrä ja rakenne vaihtelevat eri maissa. Vuonna 2007 Suomessa tuli voimaan

syöttötariffi turpeella tuotetulle lauhdesähkölle. Alun perin syöttötariffin piti olla voimassa vuoden 2010 loppuun saakka, mutta sitä on päätetty jatkaa. Valmistelut muiden uusiutuvien energiamuotojen syöttötariffin käyttöönotolle on aloitettu. [18] Markkinoiden mukaan eri tuotantomuotojen halutaan olevan samalla viivalla tukien suhteen, siis tuulivoima, aurinkoenergia ja bioenergia olisivat tasa-arvoisia energianlähteitä [19].

Erilaisista tuki- ja takuuhintajärjestelmistä on hyviä kokemuksia muualla maailmalla, ja näitä soveltamalla voitaisiin Suomessakin päästä tilanteeseen, jossa hajautetulla, uudistuviin energialähteisiin perustuvalla energiantuotannolla tuotetun energian hinta on kilpailukykyinen muiden menetelmien kanssa, ja näin investointien määrä saataisiin nousuun. Investointien kautta myös tuotantoon liittyvät muut liiketoiminnot pystyvät nostamaan profiiliaan ja näin kehittymään, kuten on tapahtunut jo muualla. Aikaisin hajautetun tuotannon teknologioihin panostaneet yritykset ovat hyötäneet kehityksestä, esimerkiksi ruotsalaiset lämpöpumppuja ja tanskalaiset tuulivoimalaitoksia valmistavat yritykset. Suomalaisilla yrityksillä on mahdollisuudet samanlaiseen markkinoiden hyödyntämiseen, kun hajautettu energiantuotanto lisääntyy maailmassa, myös vientimahdollisuudet kasvavat [19]. Eniten odotetaan tuulivoiman komponenttien, CHP-tekniikan ja bioenergian polttoaineiden ja -tekniikoiden osalta. Myös pienvesivoimaloiden turbiinitekniikka, aurinkoenergia- ja polttokennoteknologia ovat potentiaalisia vientikohteita [3].

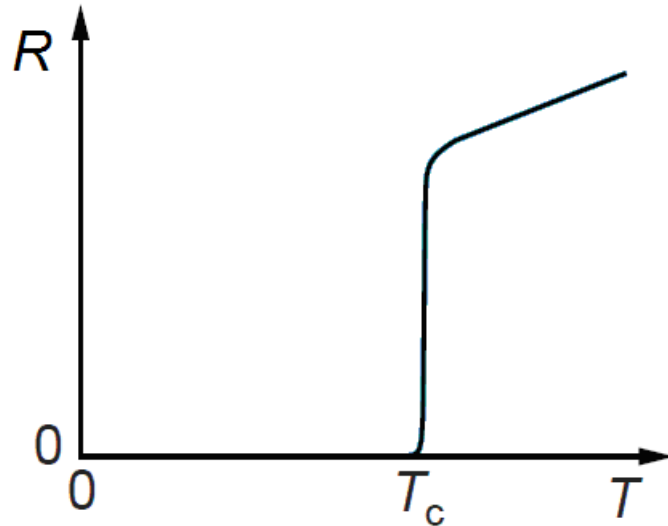
### 3. SUPRAJOHTAVUUS

Suprajohtavuus ilmiönä on jo hyvin vanha tutkimuskohde, mutta yhä tänä päivänä siitä paljastuu uusia mahdollisuuksia. Ilmiö tarkoittaa aineilla olevaa ominaisuutta, jossa riittävän matalassa lämpötilassa aineen resistiivisyys häviää. Suprajohteessa sähkövirta kulkee häviöttömästi ja ulkoinen magneettivuo ei kykene tunkeutumaan materiaaliin. Tässä luvussa tarkastellaan kyseistä ilmiötä, sen historiaa ja materiaaleja. Lisäksi tarkastellaan käytännön sovelluksia ja ilmiön hyödyntämistä hajautetussa tuotannossa. Lopuksi selvitetään, minkälainen järjestelmä on suprajohtava vikavirranrajoitin ja minkälaisia SCFCL-järjestelmiä on olemassa.

#### 3.1. Suprajohtavuusilmiö

Suuria edistysharppauksia matalan lämpötilan tekniikoissa tehtiin jo 1900-luvun alussa. Suprajohtavuus löydettiin vuonna 1911 Heike Kammerlingh Onnesin toimesta. Onnes tutki materiaalien matalan lämpötilan ilmiöitä, ja 1908 hän nesteytti onnistuneesti heliumia jäähdyttämällä sen 4,2 Kelvinin lämpötilaan. Nestemäisen heliumin avulla Onnes pystyi jäähdyttämään muita materiaaleja lähelle absoluuttista nollapistettä, ja tätä kautta pystyttiinkin tutkimaan materiaalien sähköisiä ominaisuuksia äärimmäisissä kylmyyksissä. Oli jo tiedossa, että metallien resistanssi laskee lämpötilan lähestyessä absoluuttista nollapistettä, mutta ei tiedetty, mihin asti. Useat tiedemiehet uskoivat, että elektronien liike lakkaa metallin lähestyessä 0 Kelviniä, ja näin sähkönjohtavuus häviäisi. Toiset taas uskoivat resistanssin tasoittuvan johonkin raja-arvoon, mutta säilyvän kuitenkin materiaalissa. Elohopeaa tutkiessaan Onnes selvitti, ettei raja-arvoa löytynyt, eikä elektronien liike pysähtynyt, vaan resistiivisyys katosi 4.2 Kelvinin lämpötilassa. Testissä käyttämässään elohopeajohteessa virta kulki täysin vastuksetta. Onnes kutsui löytämänsä tilaa suprajohtavuudeksi. [20]

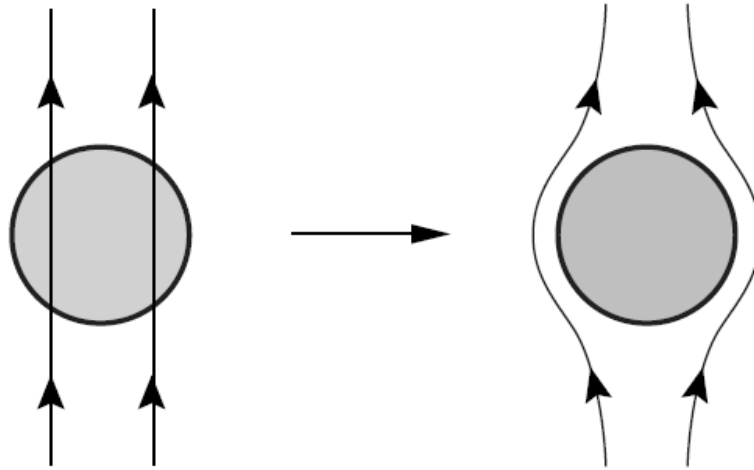
Suprajohtavuus on ilmiö, joka havaitaan useissa metalleissa, metalliyhdisteissä ja keraamisissa materiaaleissa. Kun nämä materiaalit jäähdytetään alle yksilöllisen kriittisen lämpötilan, niiden sähköiset ominaisuudet muuttuvat ja resistanssi katoaa. Lämpötilaa, jossa materiaalin resistanssi on käytännöllisesti katsoen nolla, kutsutaan kriittiseksi lämpötilaksi, ja se vaihtelee eri materiaaleilla. Käytännön järjestelmissä tämä kriittinen lämpötila saavutetaan käyttämällä muun muassa nestemäistä heliumia tai nestemäistä typpeä.



*Kuva 11: Materiaalin lämpötilan lähestyessä absoluuttista nollapistettä sen resistiivisyys katoaa.*

Koska suprajohdemateriaaleilla ei ole sähköistä resistiivisyyttä, tarkoittaen, että elektronit voivat liikkua niissä vapaasti, ne voivat johtaa suuria sähkövirtoja ilman häviöitä. Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää useissa eri käyttökohteissa. Kun virta kulkee tavanomaisessa johtimessa, kuten kuparijohtimessa, osa energiasta dissipoituu lämmöksi. Tämä johtuu elektronien törmäilyistä atomeihin ja epäpuhtauksiin johdinmateriaalissa. Suprajohteessa tilanne on toinen. Elektronit liikkuvat materiaalin läpi ilman törmäyksiä ja näin etenevät kitkatta ja energiaa hukkaamatta. BCS-teoria selittää suprajohtavuutta seuraavasti. Kun negatiivisesti varautunut elektroni liikkuu hilarakenteessa kahden positiivisesti varautuneen atomirivin läpi, se vetää atomeita puoleensa. Tämä muutos houkuttelee toisen elektronin seuraamaan, koska hilan muutos aiheuttaa positiivisen varausvanan. Tällöin elektroni kohtaa vähemmän vastusta, aivan kuten henkilöauto, joka kulkee toisen auton perässä. Nämä kaksi elektronia muodostavat välilleen heikon siteen ja matkaavat yhdessä parina, nk. Cooperin parina, kohdaten näin vähemmän vastusta. Suprajohteen alhainen lämpötila mahdollistaa elektronien pariutumisen. [21]

Suprajohteiden toinen ominaisuus on nk. Meissner-ilmiö. Kun materiaali saavuttaa suprajohtavuustilan, ulkoinen magneettikenttä ei pysty tunkeutumaan materiaaliin. Meissner-ilmiö esiintyy vain, jos suprajohteeseen kohdistuva magneettikenttä ei ole liian suuri. Voidaankin todeta, ettei sillä ole suurta merkitystä tehosovelluksia tai magneettisovelluksia tarkasteltaessa. Kriittinen kentän arvo on verrannollinen lämpötilaan siten, että se on suurimmillaan 0 K:ssä ja lähestyy nollaa, kun lämpötila lähestyy materiaalin kriittistä lämpötilaa.[21]



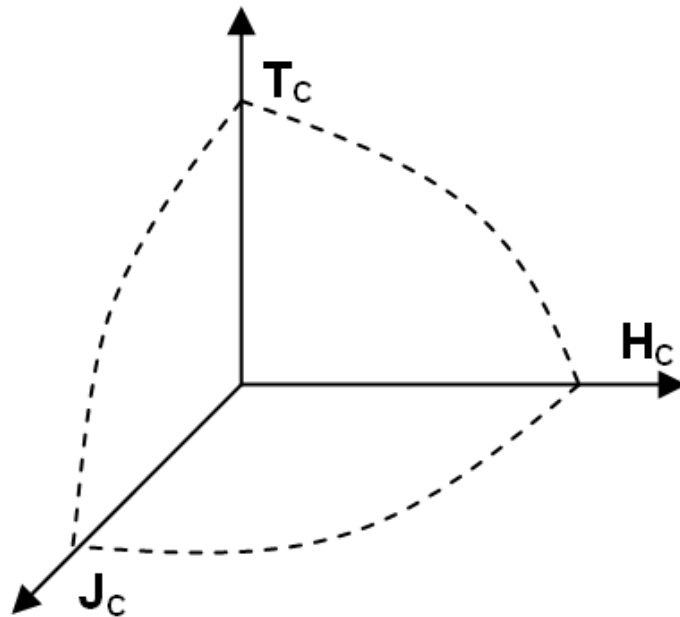
*Kuva 12: Täydellinen Meissner-ilmiö. Materiaalin siirtyessä suprajohtavaan tilaan, ulkoinen magneettikenttä ei pysty tunkeutumaan kappaleen sisään.*

### 3.2. Suprajohtavat materiaalit

Suprajohtavalta materiaalilta vaaditaan korkeaa kriittistä magneettivuon tiheyttä ja virrantiheyttä operointilämpötilassa, jotta saavutetaan halutut ominaisuudet. [20] Tässä osassa käsitellään muutamia suprajohtavia materiaaleja ja niiden ominaisuuksia.

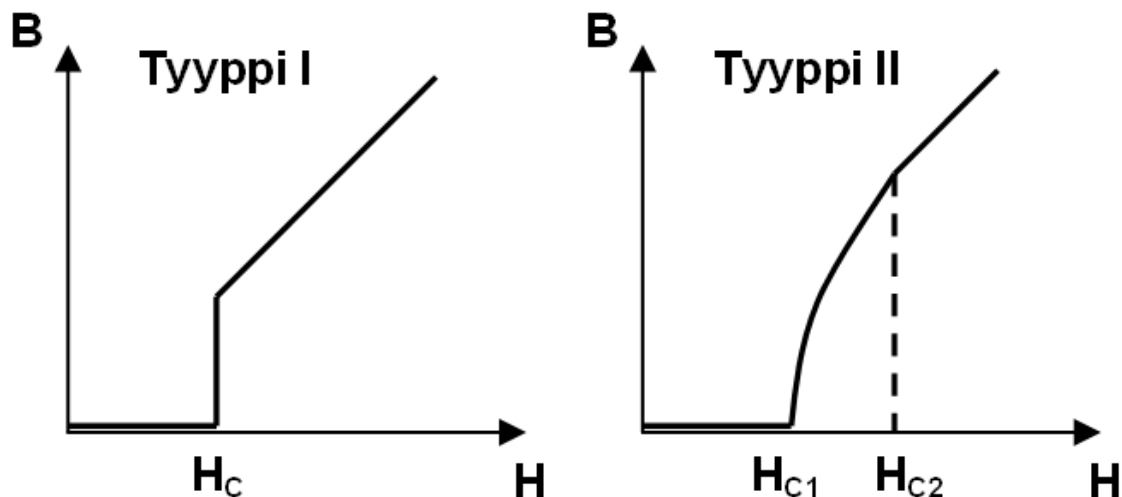
Kolme kriittistä suuretta, jotka liittyvät suprajohtavaan tilaan, ovat magneettivuontiheys, virrantiheys ja lämpötila. Jos yksikin kyseisistä kriittisistä arvoista ylitetään, materiaali siirtyy takaisin normaalitilaan ja suprajohtavuus aineessa menetetään. Nämä kolme kriittistä arvoa riippuvat myös toisistaan, sillä jos yksi kriittisistä arvoista viedään lähelle raja-arvoaan, pitää muita arvoja laskea, jotta suprajohtava tila säilyy. Kyseistä riippuvuutta kuvaa kuva 13, jossa esitetään suprajohtavuuden kolme kriittisen arvon muodostama kriittinen pinta. Tätä pintaa ei saa ylittää jos suprajohtava tila halutaan säilyttää.[21]





Kuva 13: Kriittinen pinta, jonka muodostavat kriittiset suureet lämpötila  $T_c$ , magneettivuontiheys  $H_c$  ja virrantiheys  $J_c$ .

Materiaalit voidaan jaotella usealla eri tavalla, muun muassa tyypin I ja tyypin II suprajohteisiin. Tyypin I suprajohteille on ominaista, että ne ovat täydellisiä diamagneetteja, kunnes kriittinen magneettikenttä  $H_c$  on saavutettu ja materiaali palaa normaaliin tilaan. Tyypin II suprajohteille on kaksi kriittistä kenttää,  $H_{c1}$  ja  $H_{c2}$ . Kun magneettikenttä on heikompaa kuin  $H_{c1}$ , aine on suprajohtavassa tilassa. Kun kenttä on voimakkaampi kuin  $H_{c2}$ , aine on normaalissa tilassa.



Kuva 14: Tyypin I ja II sisäisten magneettikenttien  $B$  käyttäytyminen suhteessa ulkoiseen kenttään  $H$ . [21]

Näiden välissä resistiivisyys on nolla, mutta magneettikenttä pääsee tunkeutumaan aineeseen. Tässä suprajohtavan ja normaalin tilan välissä on ns. seka-tila. Kun

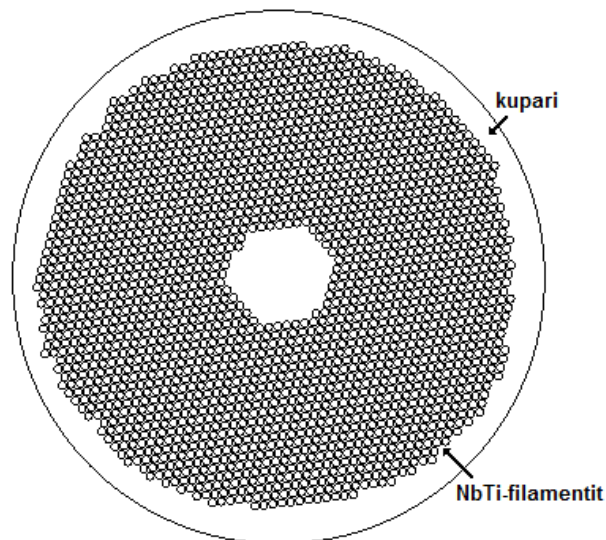
magneettikentän vuota kasvatetaan tarpeeksi, kasvaa pyörteiden määrä ja lopulta päästään normaaliin tilaan. [20]

Myös yleinen tapa jaotella eri suprajohteita on niiden kriittinen lämpötila. Johteita kutsutaan tällöin LTS (Low Temperature Superconductor)- ja HTS (High Temperature Superconductor) -suprajohteiksi.

### 3.2.1. Matalan lämpötilan suprajohteet

LTS-johtimet ovat rakenteeltaan komposiitteja, suprajohtavasta materiaalista valmistetut säikeet upotetaan matriisimetallin sisään. Tämä metalli on useimmiten kuparia tai alumiinia, ja sen käyttö selittyy stabiilisuuden ja mekaanisen kestävyysparantamisella. Kun suprajohde on suprajohtavassa tilassa, matriisimetallin tehtävä on pitää johdin koossa, kun taas häiriötilanteessa metalli johtaa lämmön pois ja näin stabiilisuus säilyy.

Niobititaani on suprajohde, jonka kriittinen lämpötila on 9,3 K ja kriittinen magneettivuon tiheys noin 11 T. Nämä molemmat arvot ovat matalampia kuin niobitinalla, mutta NbTi on yleisimmin käytetty materiaali suprajohteissa sen mekaanisten ominaisuuksien takia. NbTi on taipuisa ja muokattava materiaali ja se valmistetaan vetämällä. Niobititaanista valmistettu billetti asetetaan kuparivaipan sisään, joka lämmitetään esimerkiksi 550 °C ja vedetään 20 osaan alkuperäisestä. Tämän jälkeen vedetyt kuparivaippaiset niobititaanitangot pakataan nippuun ja vedetään uudelleen. Mitä suurempi alkuperäinen kappale on, sitä pidempi valmiista johtimesta tulee. Siksi pyritäänkin mahdollisimman suureen kappaleen halkaisijaan, sillä liitosten määrä halutaan pitää mahdollisimman alhaisena.



*Kuva 15: NbTi-suprajohde koostuu matriisimetallina toimivasta kuparista ja NbTi-filamenteista. [22]*

Näin saadaan aikaan monifilamenttisia johtimia. Filamenttien määrä riippuu sovelluksesta, mm. hiukkaskiihdyttimissä niiden määrä voi kohota yli 20000 kappaleeseen. Ohuet filamentit ovat tarkoituksellisia, koska etenevä virta kulkee ainoastaan suprajohteen pintakerroksessa. Tällä tavalla saadaan pinta-alaa kasvatettua. Tavallinen filamentin halkaisija on 10-60  $\mu\text{m}$ , ja vaihtovirtasovelluksissa halutaan yhä pienempiä halkaisijoita, jopa 0,1  $\mu\text{m}$ . [22, 20]

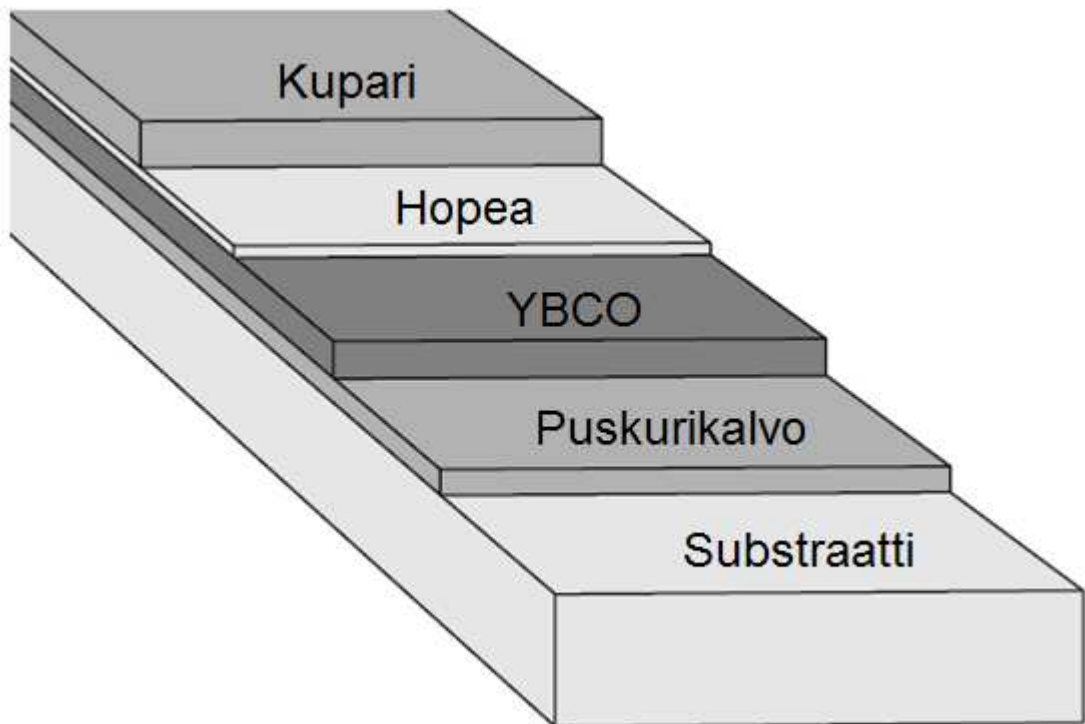
Niobitina on kalliimpaa materiaalia kuin niobititaani, mutta sen sähkömagneettiset ominaisuudet ovat paremmat, kriittinen lämpötila 18,3 K ja kriittinen magneettikenttä 24,5 T. Nämä ominaisuudet ovat omiaan suprajohtaviin magneetteihin.  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  kestää myös suuria sähkövirrantiheyksiä, vuonna 2008 ennätykseksi kirjattiin 2642 A/mm<sup>2</sup> magneettikentän ollessa 12 T ja lämpötilan 4,2 K [24]. Materiaalin haittapuolena on sen hauraus, kun suprajohtava faasi on saavutettu, joten sitä ei voi vetää johteiksi magneettikeloja varten. Tähänkin on kuitenkin keino. Jotta ominaisuudet olisivat parhaat mahdolliset, kelaan kohdistettava reaktiohehkutus tehdään vasta lopulliseen pituuteen vetämisen ja kääminnän jälkeen. Tällöin kela on ns. wind and react -tyyppinen. Valmistusprosesseja on monenlaisia. Sisäisen tinan menetelmässä Nb, Cu ja Sn ovat erillisinä materiaaleina, ja reagoivat vasta reaktiohehkutuksessa. Pronssitiemenetelmässä Nb on pakattu kupari-tina-pronssimatriisiin, ja reaktiohehkutuksen aikana Nb reagoi tinan kanssa. Myös PIT-menetelmää (Powder-In-Tube) käytetään, siitä myöhemmin lisää HTS-materiaalien yhteydessä. [23]

### 3.2.2. Korkean lämpötilan suprajohteet

Korkean lämpötilan suprajohtavilla materiaaleilla resistanssi katoaa jo 77 Kelvinasteen yläpuolella, joten jäähdytys helpottuu ja kustannukset alenevat, koska tällöin voidaan käyttää nestetyppeä tai mekaanisia jäähdyttimiä, ns. kryojäähdyttimiä. Tämä helpottaa huomattavasti kaupallisten sovellusten käyttöönottoa, vaikka massatuotantoon materiaalit eivät vielä ole valmiit. Materiaalit ovat hauraita keraameja, joten johtimen valmistus tarpeeksi pitkäksi, tasalaatuiseksi ja ominaisuuksiltaan hyväksi on vaikeaa. Voidaan olettaa, että ensimmäisenä isompaan käyttöön tulevat erikoissovellukset, joita ei ole mahdollista muilla tekniikoilla valmistaa, tai joiden suorituskyky on ylivoimainen perinteisillä materiaaleilla valmistettuihin sovelluksiin verrattuna.

HTS-materiaaleista suuren mielenkiinnon kohteena ovat vismuttipohjaiset suprajohtemateriaalit Bi-2223 ja Bi-2212. Nämä materiaalit,  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ , eli Bi-2223, jonka kriittinen lämpötila on 110 K, ja  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ , eli Bi-2212, kriittinen lämpötila 95 K, ovat potentiaalisia materiaaleja valmistettaessa käytännöllisiä suprajohtavia muuntajia, magneetteja tai sähkömoottoreita.[21]

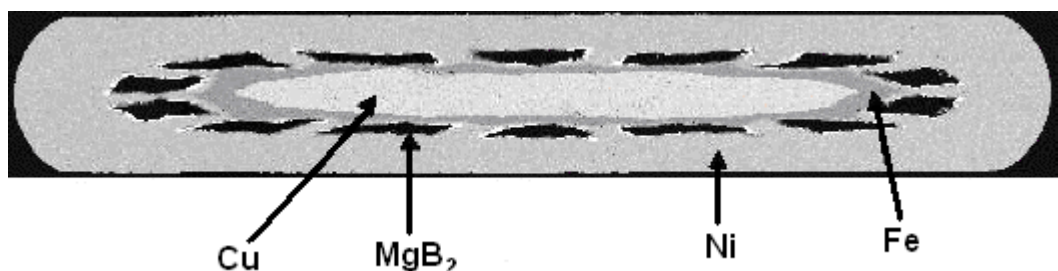
YBCO-, eli yttriumbariumkuparioksidimateriaalilla on monia etuja verrattaessa sitä toisiin keraamisiin suprajohteisiin. Se on materiaali, joka muodostuu vain neljästä kemiallisesta elementistä. YBCO on myös täysin myrkytön materiaali ja suhteellisen helppo valmistaa.



Kuva 16: YBCO-suprajohteen rakenne.

YBCO pystyy myös kuljettamaan muita materiaaleja suurempia virrantiheyksiä korkeammissa magneettikentissä. Materiaalin kriittinen lämpötila on noin 90 K. [21] Ohutfilmisovelluksissa kriittisen virrantiheyden suuruus on tärkeä ominaisuus, ja YBCO:lla saavutetaan hyviä tuloksia. YBCO:n mekaaniset ominaisuudet ovat myös erinomaiset muihin materiaaleihin verrattuna.

Magnesiumboridi on varsin uusi suprajohtemateriaali, sen suprajohtavuus havaittiin vasta 2001. Suurta kiinnostusta se herättää muun muassa hintansa takia, sillä magnesiumdiboridista valmistetut johtimet ovat noin kymmenen kertaa korkean lämpötilan suprajohteita halvempia. Siitä on myös suhteellisen helppo valmistaa johteita, ja sen sähköiset ominaisuudet ovat hyvät.



Kuva 17:  $\text{MgB}_2$  -teipin poikkileikkaus, josta nähdään käytetyt materiaalit. [25]

$\text{MgB}_2$  vaatii vielä paljon tutkimusta, jotta siitä saadaan ominaisuuksiltaan laajaan käyttöön soveltuva suprajohtemateriaali. Valmistus on vielä avoin useille parannuskohteille, joita ei muista vastaavista materiaaleista löydy, koska kaikki sen

ominaisuudet eivät vielä ole selvillä.[25] Taulukkoon 2 on kerätty käsiteltyjen materiaalien muutamia ominaisuuksia.

*Taulukko 2: Suprajohdemateriaalien ominaisuuksia.[76,77,78,79,80,81,82,83]*

<b>Materiaali</b>	<b>Kriittinen lämpötila <math>T_c</math> [K]</b>	<b>Kriittinen magneettivuontiheys <math>B_c</math> [T]</b>	<b>Yleinen käyttölämpötila <math>T</math> [K]</b>
NbTi	9,3	14,5	4,2
Nb <sub>3</sub> Sn	18,3	27,9	4,2
Bi-2223	110	150	77
Bi-2212	95	107	30
YBCO	90	130	77
MgB <sub>2</sub>	39	16	20

### 3.3. Suprajohdesovellukset

Suprajohtavuutta hyödyntävät kaupalliset sovellukset ovat vielä harvassa, vaikka ilmiö on tunnettu pitkään. Koska jäähdytys on kallista ja materiaalit ovat monimutkaisia, ei tavallisten kuluttajien ulottuville ole pystytty valmistamaan laitteita. Yleisimmät suprajohtavuutta hyödyntävät sovellukset keskittyvät voimakkaan magneettikentän luomiseen, koska kyseisillä materiaaleilla pystytään aikaansaamaan voimakkaampia kenttiä kuin perinteisillä menetelmillä pienemmin häviöihin. Sovelluksia löytyy niin elektroniikasta kuin tehoelektroniikankin puolelta.

Sovellukset voidaan jakaa kahteen eri osaan, niihin, jossa suprajohteen käyttö on välttämätöntä laitteen toiminnan kannalta, ja niihin, joissa suprajohdesovellus kilpailee tavanomaisen tekniikan kanssa. Ensimmäiseen ryhmään voidaan muun muassa laskea vikavirranrajoitinratkaisut, energianvarastointiin käytettävät magneetit ja uudet innovaatiot, kuten fuusiojärjestelmät. Toiseen ryhmään sijoittuvat esimerkiksi MRI-laitteet, generaattorit ja kaapelit.

Kaapeleissa etuina on muun muassa häviöiden pieneneminen ja valmistuksessa syntyvien päästöjen väheneminen. Generaattoreissa taas suprajohteilla parannetaan hyötysuhdetta ja voidaan pienentää laitteen kokoa. Suprajohteilla valmistettu generaattori painaa vain neljäsosan perinteisestä saman tehoisesta generaattorista, ja sillä päästään pienempiin häviöihin, parempaan transienttikäyttöön ja korkeampaan jännitteeseen staattorissa.[26]

Kaupallisesti suurin suprajohteita hyödyntävä sovellus on ollut pitkään magneettiresonanssikuvauksessa käytettävät laitteet. Suprajohteilla rakennetulla MRI-laitteella voidaan aikaansaada tarvittavan voimakkaita, yli 1,0 T magneettikenttiä. Haittapuolina suprajohteita hyödyntävässä MRI-laitteessa on korkeat valmistuskustannukset ja jäähdytyksen tarve.[26]

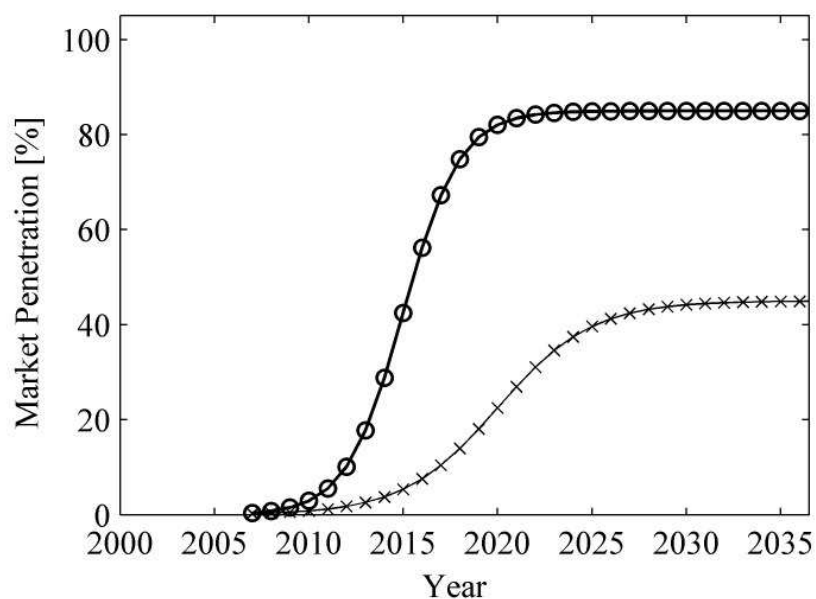
CERNin suurenergiafysiikan tutkimus ja siinä käytettävä hadronitörmäytin LHC on paljon esillä ollut suprajohdesovellus. LHC:llä on tarkoitus selvittää aineen rakenteen peruskysymyksiä, kuten kuinka maailmankaikkeus syntyi ja mikä on kaiken aineen alkuperä. Törmäytin suprajohtavia magneetteja käytetään hiukkasten suuntaukseen. LHC:ssä käytettävien magneettikenttien voimakkuus on 8,33 T [29].

Suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto (SMES) on suprajohtavasta materiaalista valmistettu magneetti, johon voidaan varastoida virtaa. Sähkömagneettista energiavarastoa voidaan käyttää eripituisten sähköntuotannon ja jakelun häiriöiden ja vaihteluiden tasoittamiseen. Tulevaisuudessa SMES-järjestelmät kilpailevat tavanomaisten akkujen, kaasuturbiinilaitosten ja pumppuvesivoimaloiden kanssa.[23] Lisäksi suprajohdesovelluksista voidaan mainita vikavirranrajoittimet, joista lisää kappaleessa 3.5.

### 3.4. Suprajohteet hajautetussa energiantuotannossa

Hajautetun energiantuotannon määrän kasvaessa ja siinä käytettävän tekniikan kehittyessä myös suprajohdesovellukset tulevat vaihtoehtoiksi järjestelmän tehostamisessa. Hajautetun järjestelmän avulla on mahdollista vähentää energiantuotannon ympäristövaikutuksia ja tuoda uusia energiantuotantomuotoja kuluttajien saataville. Mahdollisia suprajohdesovelluksia, joita voidaan käyttää hajautetussa tuotannossa, ovat muun muassa kaapelit, sähkömagneettiset energiavarastot (SMES), vauhtipyörät ja vikavirranrajoittimet.

Suprajohteesta valmistetut kaapelit voivat tulevaisuudessa olla merkittävässä osassa markkinoita hajautetun tuotannon sähköverkkoja rakennettaessa. Niiden avulla voidaan pienentää sähkönsiirrossa tapahtuvia häviöitä ja päästöjä yli 50 %.[28] On arvioitu, että HTS-kaapelit tulevat olemaan kannattavia vuonna 2010. [29]



Kuva 18: Ala- ja yläarvio suprajohdekaapeleiden markkinaosuuden kehittymisestä hajautetussa järjestelmässä.[29]

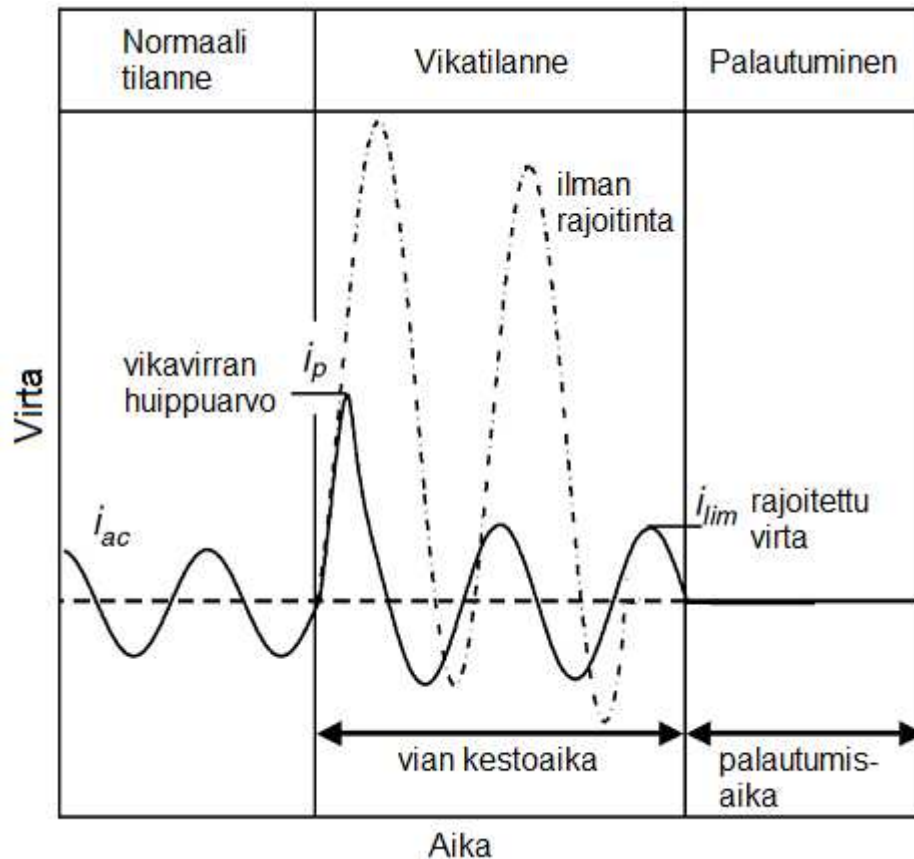
Jakeluverkko, joka yhdistää tuotantolaitoksen ja kuluttajat, pitää sisällään kaapelit ja niiden hallintalaitteistot. Koska hajautettuun tuotantoon kytketyn verkon jännite on yleensä verrattain alhainen, sopivat suprajohtavat vikavirranrajoittimet suojaamaan verkkoa vikavirroilta. Tyypillinen verkon jännite on 10–20 kV. Hajautetussa tuotannossa käytetään voimansiirtojohtoina maakaapeleita lyhyiden etäisyyksien ja vähäisten häviöiden takia. Lisäksi näin poistetaan mahdollisuus luonnonolosuhteiden, kuten myrskyjen, aiheuttamien vikojen syntyyn. Tällä hetkellä tyypillinen DG-verkossa käytettävä kaapeli on kolmivaiheinen alumiinikaapeli, mutta suprajohdekaapeleiden kehittyessä mahdollisuus niiden käyttöön on yhä suurempi. Eräs esille tullut mahdollisuus on käyttää siirrossa DC-jännitettä, joka parantaisi suprajohtavien kaapelien asemaa markkinoilla niiden hyvien DC-ominaisuuksien takia. Tällöin järjestelmä olisi yksinkertaisempi ja kestävämpi, ja vaatisi vain konvertterit AC-tuotanto- ja kulutuskohdeissa [29].

Jatkuva energian kysynnän ja tuotannon välinen tasapainottelu ja verkkoa syöttävän hajautetun energiantuotantolaitoksen mahdollinen epätasainen tuotanto tuo esiin energianvarastointitapojen kysynnän. Suprajohtavan tekniikan tarve on suuri mm. tuulivoimalla tuotetun energian hyödyntämisessä sen epätasaisuuden ja säätiloista riippuvan tuotannon takia. Energiavarastot tuovat ratkaisun paikalliseen tuotannon tasaamiseen joko varastoimalla tuotantolaitoksen ylituotannon tai purkautumalla, kun verkossa on suuri tarve energialle. Energiavarastojen pitää olla hyvin nopeita, jotta ne pysyvät verkon muutosten mukana.

### 3.5. Suprajohtavat vikavirranrajoittimet

Kun sähköjakeluverkossa tapahtuu jokin odottamaton ja epätoivottu tapahtuma, syntyy vikavirta. Nämä virrat voivat kohota moninkertaisiksi normaaliin virtaan verrattuna. Vikavirran sattuessa verkossa olevien laitteiden on oltava asiallisesti suojattu, jotta vian jälkeen verkko voi toimia moitteetta nopeasti ja ilman suuria katkoksia. Verkon laitteita, kuten kytkimiä, muuntajia ja generaattoreita suojaamaan on kehitetty erilaisia sulakkeita ja vikavirranrajoittimia. Sulakkeiden haittapuolena on huollon tarve verkossa tapahtuvan vian jälkeen. Virranrajoittimissa taas ongelmana voidaan pitää perinteisiä materiaaleja. Nykyaikaisten rajoittimien vikavirran yläraja on vain 80 kA, mikä tulevaisuudessa on liian vähän. Jos korkeille vikavirroille suunniteltaisiin tavanomaisista materiaaleista resistiivinen vikavirranrajoitin, joka hävittäisi gigajouluokan energioita, olisi valmistettava rautasydänmagneetti tilavuudeltaan  $75000 \text{ m}^3$  [26]. Tällaista ei voida pitää mitenkään käteväenä suojausjärjestelmänä. Suprajohtavat FCL:t hyödyntävät suprajohteen ominaisuutta siirtyä lämpötilan noustessa normaaliin tilaan. Vian sattuessa SCFCL:n impedanssi kasvaa, vaikka normaalissa käyttötilanteessa laite on lähes häviötön. Myös suprajohteen magneettisia

ominaisuuksia voidaan hyödyntää vikavirranrajoituksessa. Suprajohtavien vikavirtarajoittimien käyttö laitteiden suojaukseen on houkutteleva vaihtoehto, koska SCFCL tarjoaa perinteistä teknologiaa hyödyntäviin suojausmenetelmiin verrattuna ylivoimaiset ominaisuudet.



Kuva 19: SCFCL:n toiminta.[30]

Kuvassa 19 nähdään SCFCL:n toiminta vikatilanteen sattuessa. Katkoviiva kuvaa ilman rajoitinta vikatilanteessa syntyvää virtaa. SCFCL rajoittaa virtaa heti ensimmäisestä noususta alkaen ja jatkaa sen rajoittamista aina siihen saakka, kunnes virta katkaistaan. Suprajohtava vikavirranrajoitin vaatii palautumisajan vian jälkeen. Ajan pituus riippuu suprajohtemateriaalista, suprajohteen määrästä, kehittyvästä lämpömäärästä ja jäähtymisestä[30]. Palautumisajan lyhentäminen on yksi tärkeimmistä kehityskohteista suprajohtavien virranrajoittimien kohdalla. Seuraavaksi tutustutaan muutama suprajohteita hyödyntävään vikavirtarajoitinkonseptiin.

*Siltatyypin SCFCL* käyttää diodeja tai tyristoreita siltaan kytkettynä tasasuuntaajana, rajoittavaa suprajohtavaa käämiä ja jännitelähdettä. Etuna rakenteella on, että suprajohteen quench-tilaa ei hyödynnetä, joten palautumisaikaa ei tarvita. Jos siltatyypin virranrajoittimessa olevat diodit korvataan tyristoreilla tai transistoreilla, voidaan vikavirran suuruutta säätää. Tällaista rakennetta kutsutaan vikavirran-

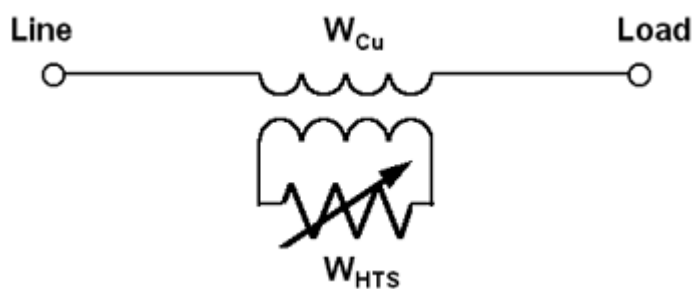


säätimeksi. Rakenne ei ole täysin vikavarma, sillä käytettävän puolijohdekomponentin epäkuntoon meneminen aiheuttaa oikosulun.[30]

*Vuolukko-SCFCL:n* rakenne pohjautuu rautasydämen ympärille kiedottuihin käämeihin ja suprajohde-elementtiin. Vian sattuessa suprajohteen resistanssi alkaa nousta, käämiin jännite kasvaa, ja suprajohteen ympärillä olevan käämin  $L_{SC}$  magneettikenttä aiheuttaa suprajohteessa nousevaa resistanssin kasvua.[32]

### 3.5.1. Induktiivinen vikavirranrajoitin

Yksinkertaisin induktiivisen vikavirranrajoittimen rakenne on rautasydänmuuntaja, jossa toisiopuolen kela on tehty suljetusta suprajohdekelasta. Ei-suprajohtavasta aineesta (kuvassa kupari) tehty käämi toimii muuntajan ensiöpuolena ja on verkon kanssa sarjaankytketty. Laitteen toiminta perustuu suprajohteen kykyyn vastustaa sen läpi kulkevan magneettikentän muutoksia. Kun ensiöpuolen suprajohteeseen indusoima virta on pienempi kuin sen kriittinen virta, magneettikenttä ei pääse tunkeutumaan rautasydämeen. Normaalitilanteessa toisiokäämissä on nolaresistanssi ja tällöin matala induktanssi. Vikavirta siirtää suprajohteen normaalitilaan, tällöin magneettikenttä pääsee tunkeutumaan rautasydämeen ja näin resistanssi kasvaa ja induktanssi nousee. Toisiokäämissä syntyvä resistanssi näkyy siis ensiöpuolella ja rajoittaa vikavirtaa. Koska käämi siirtyy normaalitilaan, vaatii se vian jälkeisen palautusajan, joka pyritään saamaan mahdollisimman pieneksi ns. rajoitusrenkaan avulla. Se asetetaan rautasydämen ympärille, jossa se kuluttaa osan vian aiheuttamasta energiasta ja näin vähentää suprajohteen lämpenemistä. Rajoitusrenkaan avulla voidaan myös säätää vikavirranrajoittimen impedanssia. [31]

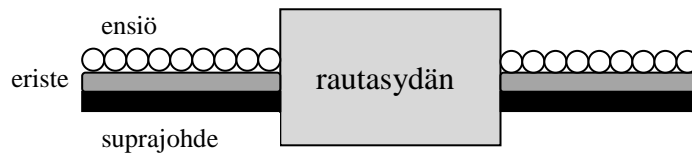


Kuva 20: Induktiivisen vikavirtarajoittimen rakenne. [33]

Laitetta käytettäessä ainoastaan suprajohtavaa materiaalia oleva osa jäähdytetään kriittisen lämpötilan alapuolelle, joten johdinten sisään- ja ulostuloja ei ole korkeista lämpötiloista mataliin lämpötiloihin. Näin säästetään jäähdytyskustannuksissa. Lisäksi suprajohde altistetaan vain suurille virroille, jännitteet pysyvät alhaisina. Induktiivisen rajoitinratkaisun suurin haittapuoli on sen suuri koko ja paino, joka on vastaavan perinteisen muuntajan tasolla.[30]

Induktiivinen SCFCL voidaan myös rakentaa toroidin ympärille. Siinä symmetrisesti aseteltuihin suprajohtaviin toisiokäämityksiin indusoitunut virta kumoaa sarjaan-kytkettyjen ensiökäämien aiheuttaman magneettivuon. Vikatilanteessa kriittisen virrantiheyden arvo ylittyy ja suprajohtavat käämit siirtyvät normaalitilaan, induktanssi kasvaa ja ensiökäämien virta rajoittuu. Käämien määrällä voidaan säädellä rajoittimen virtakapasiteettia, mitä enemmän käämejä toroidin ympärillä, sitä suurempi virtakapasiteetti.

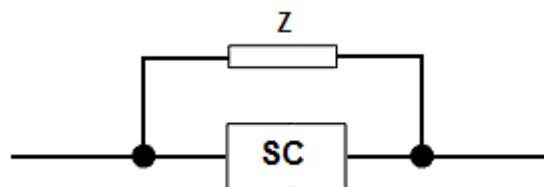
Kolmas rakenne, jota käytetään induktiivisten rajoitinten tekoon perustuu ohuisiin suprajohdelevyihin rautasydämen ympärillä ns. donitsimuodossa. Siinä eristekerros erottaa ensiö- ja toisiokäämitykset toisistaan. Rakenne toimii samalla periaatteella kuin aikaisemmat järjestelmät, käämien magneettivuot kumoavat toisensa, kunnes virta kasvaa yli kriittisen rajan, jolloin suprajohde siirtyy normaalitilaan ja induktanssi kasvaa. [34]



Kuva 21: Suprajohdelevyistä rautasydämen ympärille valmistettu induktiivinen SCFCL.

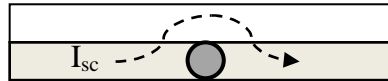
### 3.5.2. Resistiivinen vikavirranrajoitin

Yksinkertaisin SCFCL-ratkaisu on resistiivinen vikavirranrajoitin. Siinä suprajohtava elementti kytketään voimalinjan kanssa sarjaan. Elementti koostuu suprajohteen ja vastuksen rinnankytkennästä ja laitteen vaatimasta jäähdytysjärjestelmästä. Kun vika ilmenee, sen aiheuttama suuri virta nostaa suprajohteen lämpötilaa ja siirtää sen näin normaalitilaan (ns. quench), ja SCFCL:n resistanssi nousee hyvin nopeasti, ja virta siirtyy kulkemaan rinnankytketyn vastuksen kautta. Tämä rajoittaa vian aiheuttaman virran turvalliselle tasolle, suojaten näin linjan tai laitteen termisiltä ja mekaanisilta kuormituksilta. Kuormitusvirran ollessa normaali, rajoittimen impedanssi on lähes olematon, joten verkon kannalta se on näkymätön.[33] Koska verkossa kulkee AC-jännite, suprajohtavassa tilassa virranrajoittimella on pieni reaktanssi. Tämä aiheuttaa AC-häviöitä, joita suunniteltaessa pitää minimoida. Minimointi onnistuu käänimällä johtimet toistensa ympärille. Näin HTS-johtimien magneettikentät kumoavat toisensa. [21]



Kuva 22: Resistiivinen vikavirranrajoitin. Suprajohteen SC rinnalla vastus tai kela Z.

Rinnakkaisvastuksella on järjestelmässä kaksi tärkeää tehtävää, suprajohteen suojaus ja virran rajoittaminen. Koska suprajohde ei ole täysin homogeeninen materiaali virrantiheyden kannalta, eri kohdat johtimesta voivat siirtyä normaalitilaan eri aikaan. Tämä aiheuttaa johtimen ylikuumentumisen pistemäisestä kohdasta ja näin vioittuminen voi olla mahdollista. Jotta vastus toimisi mahdollisimman hyvin, tulee sen olla kytkettynä suprajohteeseen koko matkaltaan.



*Kuva 23: Suprajohteessa tapahtuva pistemäinen quench. Virta  $I_{sc}$  pääsee ohittamaan kohdan rinnakkaisvastuksen kautta.*

Vastuksen sijaan rajoittimessa voidaan käyttää myös rinnankytkettyä kela. Sen toiminta perustuu magneettikentän ja suprajohteen kriittisen virran arvojen riippuvuuteen. Tällaisessa rakenteessa kela on kiedottu suprajohteen ympärille, jolloin hyödynnetään sen tuottamaa magneettikenttää. Vian sattuessa suprajohteen normaalitila aiheuttaa kelaan virran, joka laskee kriittistä virran arvoa ja levittää normaalitilan koko johteen alueelle näin estäen pistemäisen ylikuumentumisen. Rajoittimen yli syntyvä jännite on suurempi kuin rinnakkaisvastuksella toteutetussa järjestelmässä, joten suprajohde voidaan rakentaa lyhyemmäksi. Näin säästetään materiaalikustannuksissa ja jäähdytyksessä ja pienennetään AC-häviöitä. [35]

Kun halutaan käyttää vikavirranrajoittimia hyvin suurille virroille ja jännitteille, on syytä kytkeä useampia rajoittimia rinnan ja sarjaan, jotta jännite ja virta saadaan jaettua pienempiin osiin. Rinnankytkentä on kyseisillä komponenteilla helpompaa, sillä tällöin virta jakautuu tasaisesti jokaiselle rinnankytketylle haaralle, olettaen, että haarojen resistanssit ovat lähellä toisiaan. Tasainen virranjako vaaditaan, jotta normaalitilaan siirtyminen on mahdollisimman samanaikaista. Vaiheiden väliin voidaan kytkeä muuntaja, jolla pystytään varmistamaan virtojen jakautuminen tasaisesti. Sarjaankytkettyjen rajoittimien tapauksessa jo pienet virran erot voivat aiheuttaa tehoepätasapainon, joka vaikuttaa normaalitilaan siirtymisen tasaisuuteen.

Resistiiviset vikavirranrajoittimet ovat yksinkertaisia, pienikokoisia, toimintavarmoja ja edullisia verrattuna induktiivisiin rajoittimiin. Toisen sukupolven, eli ns. 2G HTS -johtimet ovat kehittyneet nopeasti. Nämä YBCO -pohjaiset johtimet ovat erinomainen materiaali käytettäväksi resistiivisissä vikavirranrajoittimissa.

SCFCL:t eivät vielä ole kaupallisilla markkinoilla, mutta tutkimuksissa on tehty suuria edistysaskelia. Prototyyppejä on testattu useissa eri projekteissa. Ensimmäinen onnistunut kenttättestaus 10 MVA:n ja 10 kV:n resistiivisen tyyppin vikavirranrajoittimelle suoritettiin Saksassa. Testissä todettiin järjestelmän olevan luotettava ja teknisesti täysin toteuttamiskelpoinen. [90] Kaikista SCFCL-ratkaisuista

resistiivinen FCL on tällä hetkellä kaikkein houkuttelevin vaihtoehto sen yksinkertaisuuden ja keveyden takia.

Suprajohtavien vikavirranrajoittimien kehityksen suuntaa ohjaavat suuresti jännitetasot, sillä jokaisella jännitetasolla on perinteinen ratkaisu, jolla tällä hetkellä ratkaistaan vikavirtojen tuomat ongelmat. Alhaisilla jännitteillä SCFCL ei tällä hetkellä ole järjestelmä, jota pyrittäisiin käyttämään, sillä perinteiset menetelmät, kuten sulakkeet, ovat halpoja ja varmatoimisia. Kuitenkin, nämä menetelmät tarvitsevat huoltoa vian jälkeen, joten tulevaisuudessa myös SCFCL on ratkaisu myös pienien jännitteiden verkoissa. Keskitasoisen jännitteiden verkoissa perinteisesti on käytetty myös sulakkeita vikavirtasuojauksessa. Jos halpa ja yksinkertainen SCFCL pystytään kehittämään, voisi se syrjäyttää perinteiset vaihtoehdot. Korkeammilla jännitetasoilla suprajohtavat vikavirranrajoittimet olisivat erinomainen lisä, sillä rajoitusmenetelmät ovat olemattomat. Jos verkon jännitteet ovat todella isot, yli 150 kV, järjestelmän eristäminen luotettavasti nousee ongelmaksi. [36] SCFCL-ratkaisuilla voitaisiin säästää huomattavia summia, koska verkon huollontarve vähenee. Vikavirranrajoittimilla voidaan parantaa verkon turvallisuutta, luotettavuutta ja laatua. Lisäksi voidaan päästä eroon laajoista virran aiheuttamista jännitekatkoksista ja saadaan verkko palautumaan nopeammin vikatiloista.

## 4. SUPRAJOHTAVA VIRRRANRAJOITIN OFFSHORE -TUULIPUISTOSSA

Tuulivoimaa pidetään ympäristöystävällisenä tapana tuottaa sähköä. Valtioneuvoston hyväksymässä vuoden 2008 ilmasto- ja energiastrategiassa tuulivoiman osalta tavoitteena on lisätä asennettua kokonaistehoa nykyisestä noin 150 MW:n tasosta 2000 MW:iin vuoteen 2020 mennessä. Tällöin vuotuinen sähköntuotanto tuulivoimalla olisi noin 6 TWh [37]. Tämä tarkoittaisi, että tuulivoimaloiden huipunkäyttöaika olisi noin 3000 h/a. Keskimääräinen tuulivoimalan huipunkäyttöaika Suomessa on noin 2000 h/a [38]. Selonteko myös ennustaa, että vuonna 2020 sähkönkulutus on 98 TWh. Tämä siis tarkoittaa tuulivoimalla tuotetun sähkön osuudeksi noin 6 % koko kulutuksesta [37].

Tuulivoima on yksi nopeimmin kasvavia uusiutuvia energialähteitä maailmassa, ja sen kehitys on ollut jatkuvaa. Vikavirrat aiheuttavat kuitenkin ongelmia tuulivoimaa hyödynnettäessä. Tässä kappaleessa tutustutaan tuulivoiman tulevaisuuden näkymiin tekniikan osalta sekä selvitetään offshore-tuulivoiman etuja ja haittoja. Lisäksi tutustutaan aiemmassa luvussa käsiteltyjen suprajohtavien vikavirranrajoittimien käyttöön tuulivoimalan yhteydessä. Luvun lopuksi tarkastellaan työssä suunniteltavan SCFCL:n mahdollista käyttökohdetta, eli sopivaa merituulipuistoa, sekä määritetään rajoittimelta vaadittavat ominaisuudet.

### 4.1. Tuulivoiman kehitystrendit

Generaattoreiden, roottorin lapojen suunnittelun, vaihdelaatikoiden, säätötekniikoiden ja tietokoneavusteisen suunnittelun kehittymisen takia tuulivoimaloiden tehot ovat kasvaneet. Energiaomavaraisuuskysymysten esiin nouseminen ja vaihtoehtoisten energialähteiden lisääntynyt kannattavuus tuovat tuulivoiman lisärakentamisen hyväksi vaihtoehdoksi eri tuotantovaihtoehtoja tarkasteltaessa. Pyrkimys päästöjen vähentämiseen ja hajautetun tuotannon lisääntyminen tukevat myös tuulivoimaa. Yleiset teknologian kehitystrendit, kuten uudet materiaalit vaikuttavat omalta osaltaan muun muassa kustannusten alenemiseen. Tuulivoimalaitoksen tämänhetkiseksi teknologiatrendeiksi voidaan nimetä muun muassa koon kasvun hallintaan, luotettavuuden parantamiseen, voimansiirron kehitykseen ja generaattorien tehostamiseen tähtäävät suunnitelmat.

Jotta voidaan säästää muun muassa rakennus- ja materiaalikustannuksissa, pyritään kehittämään laitteista mahdollisimman pieniä. Koossa pitää ottaa huomioon esimerkiksi generaattorin turvamarginaalit, eli tekniikan tarpeellinen ylimitoitus. Uusia

toteutusratkaisuja, jotka mahdollistaisivat pienemmät koot, ovat muun muassa suprajohtavat generaattorit ja vikavirranrajoittimet.

Luotettavuutta pyritään jatkuvasti parantamaan. Keinoja vikavälien pidentämiseen ovat ennakoivat kunnonvalvonnat ja etädiagnostiikka, ja tulevaisuudessa erilaiset älykomponentit ja -materiaalit. Ennakoivan kunnossapidon järjestelmillä voidaan varoittaa etukäteen mahdollisista tulossa olevista rikkoutumista ja ennakoida tuulivoimaloiden sähköntuotantoa uhkaavia vikoja. Tämä mahdollistaa oikea-aikaisten huoltotoimenpiteiden suorittamisen ja vähentää huomattavasti vakavien vaurioiden riskiä ja keskeytyksiä sähköntuotannossa. Luotettavuus nousee erittäin tärkeäksi ns. merituulivoimaloita tarkasteltaessa, koska huoltotoimien teko vaikeutuu voimaloiden sijainnin takia.[39]

Tuulivoimaloiden vaihteistoon ja voimansiirtoon liittyvät ongelmat aiheuttavat nykyisin lähes kolmanneksen tuulivoimaloiden vikaantumisajasta.[40] Tästä syystä ne ovat eräs tärkeimmistä kehityskohteista. Voimansiirron trendinä ovat integroitujen rakenteiden, kuten generaattori-vaihteisto –yhdistelmien, kehittäminen ja komposiittien käyttäminen. Koska voimaloiden tehot ja tämän myötä vääntömomentit kasvavat, myös vaatimukset voimansiirrolle kasvavat. Tämä tarkoittaa suurempia ja vahvempia komponentteja vaihteistoon ja voimansiirtoon.[41] Lisäksi osa tuulivoiman aiheuttamista haitoista on voimansiirrosta peräisin oleva melu. Tätä myös pyritään pienentämään.

Merkittävä osuus tuulivoimalasta on sen generaattori ja sen taajuusmuuttajaratkaisut. Käytettyjä generaattorityyppejä on useita, ja tärkeänä kehityskohteena on edellä mainittu koon pienentäminen. Generaattoreiden kehitys tähtää säätömahdollisuuksien parantamiseen, jotta tuotanto voidaan pitää mahdollisimman hyvänä eri säätiloissa. Myös meluhaittoja pyritään vähentämään. [39] Lisäksi potentiaalisena ratkaisuna on nähty suprajohteita hyödyntävien generaattoreiden käyttö. Suprajohteiden avulla voitaisiin turbiineista kehittää pienempiä ja parantaa niiden hyötysuhdetta.

## 4.2. Offshore-tuulivoimalat

Eräissä maissa, kuten Tanskassa, tuulivoimalla katetaan iso osa sähkönkulutuksesta noin 20 %, kun taas Suomen sähköntuotannosta tuulivoimalla tuotetaan noin 0,3 % [42]. Kuitenkin tuulivoimaloiden haitat ympäristölleen, kuten melu ja visuaaliset haitat, rajoittavat niiden rakentamista. Lisäksi sisämaassa tuulennopeudet ovat keskimäärin 4 m/s, joka tarkoittaa, että se ei ole taloudellisesti kannattavaa ilman tukijärjestelmää. Tuntureilla tuulennopeus on noin 7-9,5 m/s, rannikoilla 6-6,5 m/s ja merialueilla 7,5-8 m/s.[43] Tämän takia offshore- eli merituulipuistoissa nähdäänkin olevan paljon potentiaalia.

Offshore-voimalat, jotka muodostavat merituulipuiston, sijoitetaan nimensä mukaisesti mereen rannikon läheisyyteen siten, että niiden aiheuttamat haitat ihmisille ja luonnolle ovat mahdollisimman vähäiset. Voimaloiden perustukset tehdään merenpohjaan, yleisimmin noin 15 metrin syvyyteen.[44] Merituulipuistoissa käytettävät voimalat ovat

yleensä suurempia kuin vastaavat maalle rakennettavat. Tällä hetkellä suurimmat rakennetut voimalat ovat 3,5 MW:n voimaloita, joiden kokonaiskorkeus on noin 100 metriä. Seuraava kehitysaskel on 5 MW:n voimaloiden rakennus, joiden korkeus tulee olemaan 150 metrin luokkaa.[45]

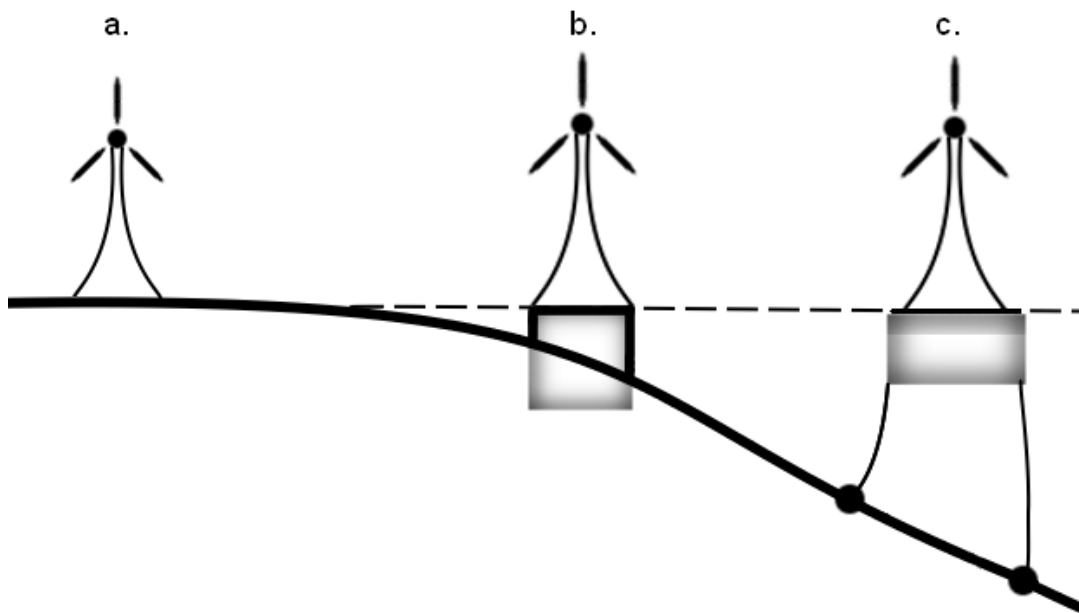
Offshore-tuulivoimaloilla on monia etuja onshore-voimaloihin nähden:

- Tuulipuiston roottorien kokonaispyyhkäisyypinta-ala voidaan kasvattaa hyvinkin suureksi
- Tuulennopeudet ovat suurempia
- Vähemmän turbulenssia, mikä johtaa parempaan tehontuottoon ja pienempiin rasituksiin
- Voimalan elinikä on korkeampi kuin maalla tasaisempien olosuhteiden takia [46]
- Tuotannon arvioidaan olevan 20-40 % suurempaa kuin rannikolla sijaitsevien tuulipuistojen [47]
- Mahdollisuus käyttää lyhyempiä torneja matalamman windshear-, eli tuuliväannekorkeuden takia. Tuuliväanteen ollessa pieni tuulivoimalan lapoihin kohdistuva tuuli kokonaispyyhkäisyalalla on tasaisempi.

Offshore-tuulivoimalan rakentamisella on myös haittoja, useimmat niistä luonnollisesti liittyvät kustannuksiin:

- Merenalaiset perustukset ovat kalliita
- Voimalan kytkeminen verkkoon on kalliimpaa ja monimutkaisempaa kuin maalla
- Voimalan kokoonpano avomerellä on kallista, vaarallista ja vaatii erikoislaitteistoa
- Luokse pääsy vikatilanteessa on hitaampaa ja hankalampaa, mikä voi johtaa huipunkäyttöajan pienemiseen.

Uudeksi vaihtoehdoksi on kehitetty kelluva tuulivoimala. Ratkaisun avulla voitaisiin vähentää voimaloiden aiheuttamaa melusaastetta rakentamalla ne syvään veteen ja ns. puhtaaseen, pyörteettömämpään tuuleen. Ensimmäinen, 2,3 MW:n voimala on testikäytössä Norjan rannikolla, ja sen odotetaan olevan kustannuksiltaan kilpailukykyinen ratkaisu.

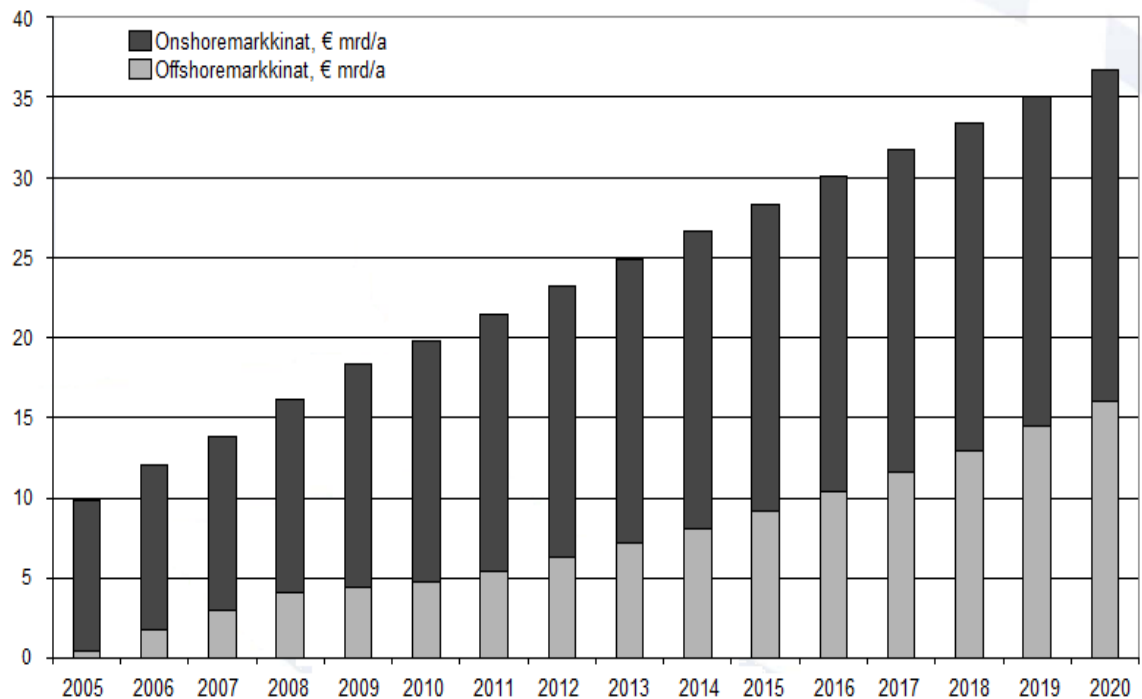


*Kuva 24: Kolme tyypillistä tuulivoimalan asennustapaa: a) onshore, b) offshore ja c) kelluva.*

Prototyypeissä kelluntaan käytetään kahdenlaisia rakenteita. Toinen kelluva rakenne hyödyntää öljynporauslautoissa aikaisemmin käytettyä tekniikkaa, ja toinen pitkää, syvälle merenpinnan alapuolelle ulottuvaa köliä, joka pitää voimalan vakaana. [48]

EWEA:n (European Wind Energy Association) tulevaisuusskenaariossa on asetettu tavoitteeksi, että offshore-tuulivoiman kapasiteetti Euroopassa vuonna 2020 olisi 40 GW ja vuonna 2030 150 GW. Tällöin samaan vuoteen mennessä avomerelle asennettu tuulivoimakapasiteetti pystyisi tuottamaan noin 15 % koko Euroopan Unionin alueen tarvitsemasta energiasta. [49]





Kuva 25: Ennuste onshore- ja offshore-tuulivoiman markkinoiden kehityksestä vuosina 2005-2020.[39]

Vuoteen 2008 mennessä asennettu kapasiteetti on 1471 MW kahdeksassa eri Euroopan maassa, ja suunniteltua kapasiteettiä on 37 GW:n verran. Suuritehoisia tuulipuistoja on kehitteillä useiden maiden vesille, ja tähän mennessä suurin tuulipuisto, Horns Rev 2, vihittiin käyttöön Tanskan rannikolla syyskuussa 2009. Se on kooltaan 209 MW ja tuottaa sähköä 200000 taloudelle. Kuvasta 25 nähdään ennuste eri menetelmillä tuotetun tuulivoiman markkinoiden kehityksestä. Kuten voidaan nähdä, offshore-tuotannon osuuden tuulivoiman kokonaismarkkinoista ennustetaan kasvavan huomattavasti tulevaisuudessa.[50]

### 4.3. SCFCL:n soveltuvuus tuulivoimaloihin

Kun sähköntuotantoa lisätään verkkoon, myös vikavirrat lisääntyvät. Tällöin on tarpeellista huolehtia käytettävien järjestelmien suojauksesta. Jos vika, esimerkiksi oikosulku, tapahtuu verkkoon kytketyssä tuulivoimalassa, vikavirta kulkee verkkoon ja vahingoittaa järjestelmässä olevia laitteita. Verkossa tapahtuva häiriö vastaavasti aiheuttaa ongelmia voimalan laitteistoissa. Suprajohtavien vikavirranrajoittimien käyttö tuulivoimaloiden yhteydessä estää vikavirran pääsyn verkkoon ja verkosta voimalan laitteisiin.[30] Nykyään tuulivoimaloissa ei ole oikosulkuvirroilta suojaavaa tekniikkaa, sillä jotta se olisi tehokas, suojauksen pitää toimia ja vikavirta on rajoitettava heti ennen ensimmäistä huippua.

Suurien vikavirtojen ongelma on ratkaistu isolla turvamarginaaleilla tuuligeneraattorien mitoituksessa. Tällä tavalla generaattori on rakennettu kestävästi mekaanisesti ja termisesti hyvin suuria rasituksia sekä noin viisinkertaisen oikosulkuvirran nimellisvirtaansa nähden. Tämän virran se kestää kuitenkin vain erittäin lyhyen aikaa. Haittapuolena ratkaisulla on rakentamisen ja asentamisen kustannusten nousu ja koon kasvu. SCFCL-suojauksella voidaan säästää näissä kaikissa, sillä tällöin voidaan käyttää pienempiä turvamarginaaleja. [51]

#### 4.4. Tuulipuiston koon määrittäminen

Seuraavaksi pyritään määrittelemään koko tuulipuistolle, johon edellä mainittu SCFCL voidaan järkevästi asentaa. Ensin tarkastellaan Suomen merituulivoimalahankkeita. Suomessa käytössä on yksi merituulta hyödyntävä tuulipuisto, Kemin Ajoksella. Puiston kokonaiskapasiteetti on 30 MW, ja turbiineja puistossa on 10. Seitsemän näistä pystytettiin keinotekoisille saarille ja etäämmälle rannasta. Ensimmäinen merituulipuistoa koskeva vesilupahakemus jätettiin lokakuussa 2009. Suunnitelmia tulevaisuuden merituulivoimaloille on useita. Taulukossa 3 on lueteltu tämän hetken offshore-voimalaprojektit.

*Taulukko 3: Suomessa vireillä olevat offshore-tuulivoimalaprojektit [50, 53]*

<i><b>Projekti</b></i>	<i><b>Kapasiteetti (MW)</b></i>	<i><b>Valmistumisvuosi</b></i>
Kemi Ajos 1 ja 2	30	2008
Pori offshore 1	6	2010
Pori offshore 2	90	2011
Kemi 3	120-200	2011
Inkoo / Raasepori	180-300	2012
Tornio Röyttä 3	180-300	2012
Raahe / Maanahkiainen	300-500	2012
Suurhiekkä	400-600	2013
Kristiinankaupunki	240-400	2014
Korsnäs	600-800	2015
Pitkämatala	800-900	2015
Maakrunni	350-400	2015
Oulu-Haukipudas	500-800	2016

Kuten taulukosta käy ilmi, useimmat niistä ovat suunnitteluvaiheessa. Luvuista nähdään, että suunnitellut merituulipuistot ovat yhä suurempia. Tämä tarkoittaa, että tuulivoima tavoittaa yhä suuremman määrän asiakkaita, ja voimaloiden pääasiallinen tarkoitus on tuottaa koko maan verkkoon sähköä. Isojen tuulipuistojen katsotaankin sijoittuvan siirtoverkkotasolle ja niitä verrataan muihin suuriin voimalaitoksiin. Jos

tarkastellaan tuotantoa hajautetun tuotannon kannalta, voidaan silti katsoa tuulivoimalan tuottavan sähköä juuri paikallisille asiakkaille. Yksi määritelmä hajautetuksi tuulivoimatuotannoksi on laskea mukaan vain tuulipuistot, jotka ovat kytketty keski- tai pienjänniteverkkoon [53].

Yleisesti tuulipuistojen kokoa määriteltäessä on otettava huomioon sähköverkosta aiheutuvat rajoittavat tekijät, oli kyse sitten suuren luokan tuulipuistosta tai pienestä tuotantolaitoksesta. Pitää muistaa, että useimmissa tapauksissa tuulivoimapuisto kytketään olemassa olevaan verkkoon, jolloin sen ominaisuudet on huomioitava. Verkko, joka on lähimpänä offshore-voimaloita, ei välttämättä ole rakennettu tuotantoa varten. Johdon, muuntajien ja muiden komponenttien kuormitettavuus on huomioitava. Kuluttajien käyttöönsä saama jännite pitää pysyä asetettujen toleranssien sisäpuolella, joten jännitteenmuutos ei saa olla liian suuri normaalissa käytössä, eikä tuotantolaitosta liitettäessä tai erotettaessa. Lisäksi on huomioitava erilaisten häiriöiden syntyminen, muun muassa välkyntä pitää minimoida. [54]

Määriteltäessä tässä työssä ja SCFCL:n mitoituksessa hyödynnettävää esimerkkituulipuistoa käytetään hyväksi Suomeen suunnitteilla olevia merituulipuistoja. Hankkeita tarkasteltaessa havaitaan keskisuuren puiston olevan kokonaisteholtaan noin 400 MW. Jos oletetaan turbiinien olevan kooltaan tulevaisuudessa luultavasti yleistäviä 5 MW:n suuruisia, puiston koko olisi tällöin 80 tuulivoimalaa. Tämä vastaisi muun muassa suunnitteilla olevan Suurhiekan 400 MW:n merituulipuistoa, jonka on arveltu tuottavan valmistuessaan noin 1,5 TWh sähköä. Tämä vastaa arviolta 350000 ei-sähkölämmitteisen asunnon vuosittaista sähkönkulutusta.

Suurhiekan merituulipuisto on suunniteltu sijoittuvan noin 20–25 km rannikosta Haukiputaan ja Iin edustalla, ja käsittäisi noin 15300 hehtaaria matalikkoa. Sen kaapeloinnissa käytettäisiin 20 - 45 kV:n merikaapelia, jolla se yhdistettäisiin paikalle rakennettavaan merisähköasemaan. Asemasta eteenpäin tuulipuisto voidaan kytkeä vaihtovirta- tai tasavirtakaapelilla joko 400 kV:n valtakunnanverkkoon tai 110 kV:n jakeluverkkoon, tuotantoteho sanelee mihin jänniteportaaseen yksikkö voidaan sijoittaa verkon kapasiteetin puitteissa. 400 MW:n kokoinen tuulipuisto on suunniteltu kytkettäväksi 400 kV:n verkkoon. Pöyry Energy Oy:n ympäristövaikutusten arviointiselostuksessa tuulipuiston huipunkäyttöajaksi on arvioitu noin 3750 tuntia vuodessa. Alla olevassa taulukossa on esitelty Suurhiekan projektivaihtoehdot ja niiden teknisiä tietoja. Vaihtoehdossa 1 tuulipuiston koko on 400 MW, vaihtoehdossa 2 353 MW ja vaihtoehdossa 3 600 MW. Tuulivoimaloiden lopulliseen lukumäärään ja yksikkökokoon vaikuttavat eri voimalakokoluokkien tekninen ja kaupallinen kehitys lähivuosina. [55]

Taulukko 4: Suurhiekan tuulipuiston tekniset tiedot [55]

<i>Selite</i>	<i>400 MW tuulipuisto</i>	<i>353 MW tuulipuisto</i>	<i>600 MW tuulipuisto</i>
Nimellisteho	80*5 MW	98*3,6 MW	120*5 MW
Tornin korkeus	100 m	80 - 100 m	100 m
Roottorin halkaisija	126,5 m	107 m	126,5 m
Lakikorkeus	166 m	134 - 154 m	166 m
Nettokäytettävyys	95 %	95 %	95 %
Vuotuinen käyntiaika	6000 - 7000 h	6000 - 7000 h	6000 - 7000 h
Huipunkäyttöaika	3750 h/a	3750 h/a	3750 h/a
Vuotuinen sähkön tuotanto	noin 1500 GWh/a	noin 1320 GWh/a	noin 2250 GWh/a

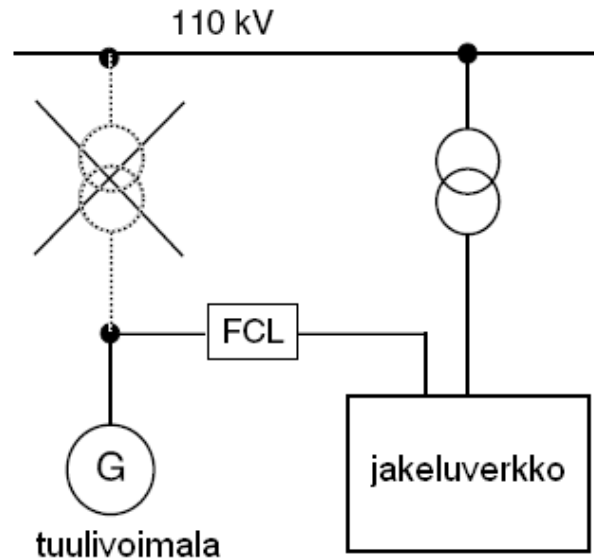
#### 4.5. SCFCL:n virranrajoitusominaisuuksien kiinnittäminen

Suprajohtavan vikavirranrajoittimen virranrajoitusominaisuudet ovat erittäin tärkeä osa suunnittelua. Ne määrittävät laitteen toiminnan, ja täten määräävät minkälaisilta vikavirroilta laite pystyy suojattavan järjestelmän turvaamaan.

Kyseisessä tilanteessa tutkitaan yhtä vaihetta. Parametrit, jotka vaikuttavat vikavirranrajoittimen suunnitteluun, ovat normaali käyttöjännitetaso, rajoitettu vikavirran huippuarvo, vian kesto aika ja läpikulkeva virta normaalissa käyttötilanteessa. Rajoittimen oikosulkum impedanssi on myös tärkeä osa sen toimintaa, sillä se määrittelee oikosulkuvirran. Lisäksi rajoittimelta halutaan mahdollisimman lyhyt palautumisaika.

Parametrien määrittelyssä käytettiin hyödyksi nykyisten SCFCL -projektien informaatiota sekä erään energiayhtiön asiantuntijan haastattelua. Näiden avulla koottiin tietoa siitä, miten SCFCL saataisiin käyttäytymään halutusti oletetussa ympäristössä.

Tuulivoimalan verkkoon sovittaminen alkaa jokaisesta turbiinista, yleensä tornin juurelta, jossa generaattorin jännite, tavallisesti 690 V, muunnetaan yleisesti 33 kV:n jännitteelle. Esimerkkituulipuiston sisäiseksi kaapelointijännitteeksi on suunniteltu 20 – 45 kV. Jotta jännitehäviöt voidaan pitää mahdollisimman pienenä, jännite muutetaan suuremmaksi mahdollisimman lähellä turbiinia. Valittu jännitetaso on suosittu, koska kyseiseen tasoon komponentteja on runsaasti ja edullisesti saatavilla. Lisäksi suurempaan jännitteeseen muuntamiseen käytettävät komponentit veisivät enemmän tilaa tornista. [56] Teoriassa sisäinen kaapelijännite, 20 kV, voitaisiin liittää kuvan 25 mukaisesti suoraan jakeluverkkoon, olettaen suojauksen olevan kunnossa. Tällöin voitaisiin turvata alueen sähkönsaanti siirtojohtoverkossa tapahtuvan vian aikana.



Kuva 26: Suprajohtava vikavirranrajoitin (FCL) kytkettynä voimalan (G) ja jakeluverkon välissä.

Tyypillisesti alueverkoissa virranrajoittimen kuormitusvirta olisi alle 1 kA ja jakeluverkoissa noin 1-2 kA. Jotta SCFCL olisi toimiva, on otettava huomioon kuormitusvirtaa suuremmat kytkentävirtasysäykset ja käynnistysvirrat, jotka rajoittimen tulee päästää läpi. Suunnitteluparametreihin valitaan kuormitusvirraksi 1 kA. Jakeluverkossa syntyvä oikosulkuvirta on tyypillisesti 0,3-10 kA [57]. Suunnittelussa pyritään rajoittamaan vikavirta puoleen, eli asetamme virraksi 5 kA.

Kestoaikaa ja rajoittimen palautumisaikaa tarkasteltaessa on huomioitava verkon muut suojausjärjestelmät. Tyypilliset verkossa käytettävät suojausmenetelmät ovat pikajälleenkytkentä, jossa häiriön kohteeksi joutunut verkon osa kytketään jännitteettömäksi 0,3 - 0,5 sekunnin ajaksi, ja aikajälleenkytkentä, eli toimenpide, joka suoritetaan tapahtuneen häiriön selvittämiseksi, mikäli pikajälleenkytkentä ei ole onnistunut. Yleinen arvio pikajälleenkytkennän jännitteettömäksi ajaksi on 0,4 sekuntia. [58] Käytännössä palautumisaika olisi hyvä mitoittaa siten, että se on pikajälleenkytkentää lyhyempi, eli rajoittimen palautumisaika olisi noin 0,3 s. Jotta voidaan estää itse laitteen vikaantuminen, vikavirta ei saa kestää liian kauan. Jotta lämpötilan liiallinen nousu voidaan estää, vian kestoksi voidaan määritellä 0,5 s. Tähän vaikuttaa myös verkon muu suojaus. Yleisesti suuret vikavirrat katkaistaan nopeasti ja pieniä rajoitetaan pidempään. Koska käsittelemme verrattain isoja vikavirtoja, määritelty 0,5 s on hyväksyttävä aikamäärä.

Normaalitilanteessa vikavirranrajoitin pyrkii olemaan verkolle ”näkymätön”, eli sen häviöt verkkoon pitää olla pienet. Suunniteltavan rajoittimen normaalitilan impedanssi pitää ottaa kuitenkin laskennallisesti huomioon, sillä täysin häviöttömään ratkaisuun ei päästä. Impedanssi on vastaavissa järjestelmissä joitakin milliohmeja, ja suunnitelmassamme pyrimme mahdollisimman pieneen häviötehoon. Lähtöarvoksi kiinnitämme 5 mΩ. [59]

Oikosulun aikana vikavirranrajoittimen impedanssi kasvaa rajoittaen näin sen läpi kulkevaa virtaa. Tämän impedanssin saamme laskettua edellä valituista jännitetasosta  $U_n$  ja rajoitetusta oikosulkuvirrasta  $I_{lim}$ . Tuloksena saamme minimi-impedanssin  $R_{lim}$ , jolla haluttu vikavirta saavutetaan.

$$R_{lim} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{lim}} = \frac{20kV}{\sqrt{3} \cdot 5kA} = 2,309\Omega \quad (1)$$

Suunnittelussa tarvittavat parametrit voidaan siis kiinnittää seuraavasti:

*Taulukko 5: Virranrajoittimen suunnittelussa käytettävät parametrit*

<b>Parametri</b>	<b>Arvo</b>
Jännitetaso	20 kV
Operointivirta	1 kA
Impedanssi operointitilassa	5 mΩ
Impedanssi oikosulussa ( $R_{lim}$ )	2,309 Ω
Rajoitettu oikosulkuvirta	5 kA
Vian kesto aika	500 ms
Rajoittimen palautumisaika	300 ms

Näiden parametrien avulla voidaan suunnitella haluttu suprajohtava vikavirranrajoitin. Parametreja hyödynnetään sopivan johteen valinnassa, sekä koko järjestelmän käytön pohdinnassa. Tähän liittyy myös tärkeänä osana jäähdytysjärjestelmän huomioon ottaminen. Pitää muistaa kuitenkin, että suunnittelu on yksinkertaistettu, eikä kaikkia mahdollisia vaatimuksia voida tarkastelussa ottaa huomioon.

## 5. SCFCL:N MALLINNUS JA MITOITUS

Tässä luvussa käsitellään suprajohtavan vikavirranrajoittimen mallinnusta ja mitoitusta. Aluksi tarkastellaan kahden eri materiaalin, YBCO:n, eli 2G-suprajohteen, ja  $\text{MgB}_2$ :n avulla valmistettujen suprajohteiden statusta ja ominaisuuksia. Näiden jälkeen suunnitellaan kummankin materiaalin avulla vikavirranrajoitinmoduuli, joka soveltuu käytettäväksi hajautetussa energiantuotannossa. Moduuli suunnitellaan edellisen kappaleen mitoitustiedon ja materiaalien ominaisuuksien perusteella. Lisäksi tarkastellaan suunniteltujen järjestelmien AC-häviöitä ja quenchiiä, sekä käytettävää kryoinfrastruktuuria ja jäähdytystä.

### 5.1. 2G-suprajohde YBCO

YBCO ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ), eli yttriumbariumkuparioksidi, on tällä hetkellä yksi eniten kiinnostusta herättävistä materiaaleista, ja tutkimusta tehdään paljon ohutkalvotekniikan saralla. Kyseisellä tekniikalla päästään eroon YBCO:lle tyypillisestä hauraudesta.[60] Tekniikan avulla voidaan kasvattaa valmistettavien johdinten yksikköpituutta.

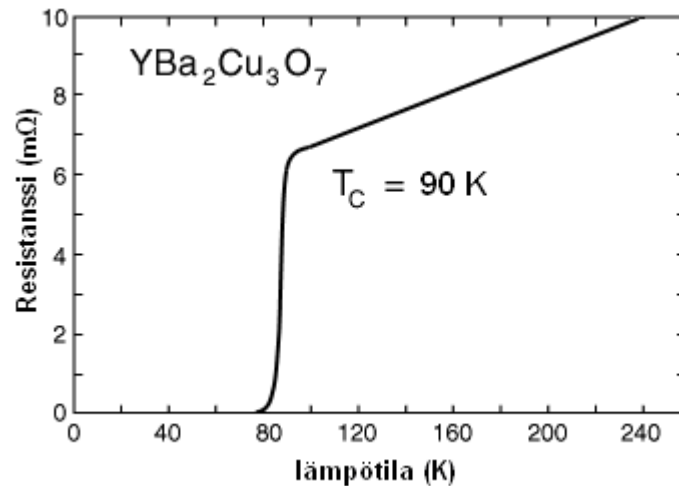
#### 5.1.1. YBCO:n ominaisuudet ja rakenne

Taulukossa on lueteltu muutamia ohutkalvomenetelmällä valmistetun yttriumbariumkuparioksidimateriaalin ominaisuuksia. YBCO muodostaa materiaali- ja johtavuusominaisuuksiensa ansiosta käytännön sovellusten kannalta hyvän kompromissin verrattuna muihin kaupallisiin suprajohtemateriaaleihin.

*Taulukko 6: YBCO:n ominaisuuksia. [60, 61, 62]*

<i><b>Ominaisuus</b></i>	<i><b>Arvo</b></i>
Kriittinen lämpötila	n. 90 K
Kriittinen virrantiheys	$4 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ (0 T, 77 K)
Resistiivisyys normaalitilassa	$1,5 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ (77 K)
Ominaislämpökapasiteetti	$1,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ (77 K)
Lämmönjohtavuus	0,530 W/mK

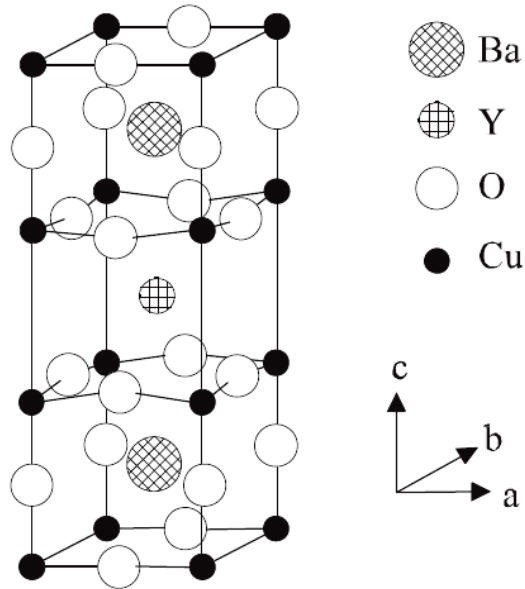
Aineella on muihin suprajohdemateriaaleihin nähden yliverlainen kriittisen virrantiheyden arvo myös voimakkaissa magneettikentissä. YBCO:n kriittinen lämpötila on noin 90 K. Tämä mahdollistaa nestemäisen typen käytön jäähdytyksessä. Kuvassa 27 näemme materiaalin resistiivisyyden käyttäytymisen kriittisen lämpötilan läheisyydessä. Kriittisen lämpötilan saavutettuaan resistiivisyys putoaa nopeasti hyvin pieneksi ja materiaali siirtyy suprajohtavaan tilaan.



Kuva 27: YBCO:n resistiivisyys lämpötilan funktiona.

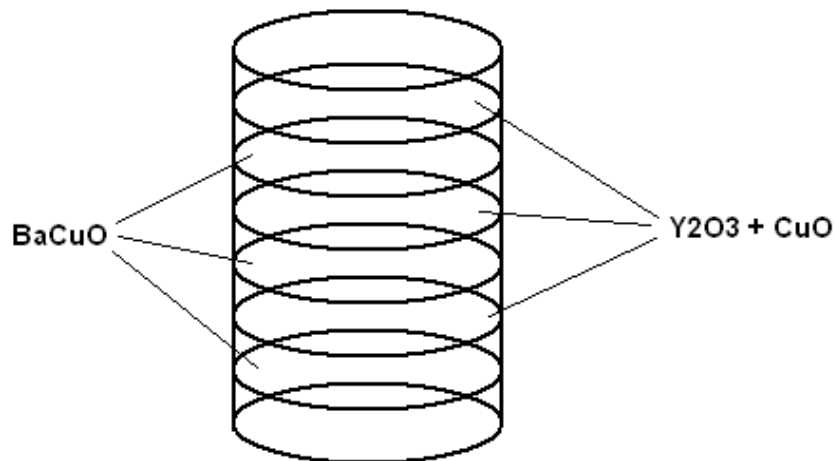
YBCO on rakenteeltaan kide­mäinen kerrosrakenne, ns. perovskite-rakenne. Jokainen kerros rajoittuu  $\text{CuO}_4$ - tai  $\text{CuO}_2$ -tasoon, ja näiden välissä ovat yttrium- ja bariumatomit. Yhdisteen suprajohtavuusominaisuudet määräytyvät suuresti  $\text{CuO}$ -tasojen rakenteiden avulla. Kiderakenne merkitsee, että Cu-kerroksissa on tilaa hapelle. Kriittisen lämpötilan on huomattu olevan riippuvainen hapen määrästä kiderakenteessa, ja valmistuksessa pyritäänkin yhdiste hehkuttamaan hapessa, jotta saadaan sen määrää kasvatettua.[63]





Kuva 28: YBCO:n rakenne.[64]

Tällä hetkellä YBCO on tärkeä tutkimuskohde, ja muun muassa sen kriittistä lämpötilaa pyritään nostamaan. Kuitenkin yritykset  $T_c$ :n nostamiseen yli 105 Kelvinin, joka on ns. Ultra-YBCO:n, kehittyneen YBCO-materiaalin kriittinen lämpötila, eivät ole vielä tuottaneet tulosta, josta olisi hyötyä suuremmassa mittakaavassa. Esimerkkinä uusimmista tutkimusprojekteista voidaan pitää YBCO:a, jolla on päästy aineen rakennetyyppiä muuttamalla 175 K kriittiseen lämpötilaan. 90 K YBCO:n rakenteessa on kuusi metallikerrosta yhdessä solussa, kun taas uudessa rakenteessa kerrosten määrä on kasvatettu kuuteentoista. Uuden rakenteen nimeksi on annettu "Hyper YBCO", ja sen valmistamisessa käytetään kerrostusmenetelmää. On havaittu, että 16 on ideaalinen kerrosten määrä. Hyper YBCO:n kemiallinen kaava on  $\text{YBa}_3\text{Cu}_4\text{O}_x$  ja sitä kutsutaan myös nimellä HY-134. Kyseinen materiaali on niin uusi, ettei sitä ole vielä viety johdinteippiasteelle, mutta tutkimusta jatketaan yhä. [23]



Kuva 29: Esimerkki Hyper-YBCO:n kerrosrakenteesta.

### 5.1.2. YBCO-johteiden valmistajat ja tuotteet

Ohutkalvo-YBCO:n valmistajia on maailmalla useita. Seuraavaksi tarkastellaan muutamaa yritystä ja niiden valmistamia 2G-HTS-johteita. Yritysten tuotteista pyritään löytämään ominaisuuksiltaan sopiva materiaali SCFCL-käyttöä ajatellen. Yritysten tuotteista on poimittu muutamia tietoja, jotka voivat olla apuna suunnittelussa käytettävää johdetta valittaessa.

#### Bruker HTS

Saksalainen Bruker HTS on osa Bruker Corporationin suprajohtavia materiaaleja valmistavaa osastoa, BEST:ia (Bruker Energy & Supercon Technologies). Yritys on keskittynyt HTS-ohutkalvojen, -johdinten ja -kelojen valmistamiseen. YBCO-ohutkalvoja yritys valmistaa tällä hetkellä kolmea eri versiota. YHT-FC -johdin on optimoitu SCFCL-käyttöön, mm. quench-käyttäytymisen osalta. Siinä käytetään substraattina 100 tai 50  $\mu\text{m}$  paksua ruostumatonta terästä. Taulukossa 7 luetellaan kyseisen tuotteen ominaisuuksia.

*Taulukko 7: YHT-FC: ominaisuuksia [64]*

<b><i>Ominaisuus</i></b>	<b><i>Arvo</i></b>
Myyntinimi	YHT-FC
Kokonaispaksuus	0,105 – 0,05 mm
Johtimen maksimipituus	100 m (leveys 4 mm)
Saatavilla olevat leveydet	4, 10, 12 ja 40 mm
YBCO:n paksuus	0,5 – 3 $\mu\text{m}$
Suojauskerroksen paksuus	0,2 $\mu\text{m}$ (kulta tai hopea)
Virrantiheys	300 – 1000 A/mm <sup>2</sup> (0T, 77K)
Kriittinen virta	135 A – 1000 A riippuen leveydestä
Kriittinen taivutushalkaisija	10 – 18 mm
Maksimi vetolujuus	650 MPa

#### American Superconductor

American Superconductor on eräs suurimmista HTS-johdinten valmistajista maailmassa. Johdinten lisäksi yritys valmistaa myös suprajohtavia materiaaleja hyödyntäviä laitteita. YBCO-johtimia yritys valmistaa kolmea erilaista versiota eri käyttötarkoituksiin: Korkean virrantiheyden johtimia mm. keloihin, messinkivahvisteisia johtimia suurivirtaisiin ratkaisuihin, kuten kaapeleihin ja

ruostumattomalla teräksellä stabiloituja johtimia vaativiin sovelluksiin, kuten vikavirranrajoittimiin. Taulukossa 8 listataan kyseisen materiaalin ominaisuuksia.

*Taulukko 8: 344S:n ominaisuuksia [65]*

<b>Ominaisuus</b>	<b>Arvo</b>
Myyntinimi	Type 344S
Kokonaispaksuus	0,275 – 0,310 mm
Leveys	4,27 – 4,55 mm
Minimi taivutushalkaisija	25 mm
Maksimi vetolujuus	300 MPa
Minimi kriittinen virta	70 – 90 A
Virrantiheys	5,200 – 6,700 A/cm <sup>2</sup>

Valmistaja lupaa, että johdin on suunniteltu mekaanisesti kestäväksi, nopeisiin lämpötilan muutoksiin ja tilanteisiin, jossa virranrajoitusominaisuudet ovat tärkeitä. Johdin on vahvistettu ja stabiloitu, ja sillä on normaalitilassa korkea resistiivisyys.

### **SuperPower Inc.**

SuperPower Inc. valmistaa 2G-HTS-johtimia. Yritys luokittelee YBCO-johtimensa kahdeksaan eri luokkaan, joista kaksi on suunniteltu SCFCL-käyttöä ajatellen. Niiden ominaisuuksiin kuuluu vahvasti resistiivinen substraatti, nopea vasteaika, matala quench-virta ja nopea palautuminen. Taulukossa 9 on todettu SCFCL-käyttöön soveltuvan YBCO-johtimen ominaisuuksia.

*Taulukko 9: SF12050:n ja SF12100:n ominaisuuksia [66]*

<b>Ominaisuus</b>	<b>Arvo</b>
Myyntinimet	SF12050/SF12100
Leveys	12 mm
Kokonaispaksuus	0,055/0,105 mm
Johtimen maksimipituus	600/300 m
Stabiloinnin paksuus (Cu)	0,001 – 0,04 mm
Substraatin paksuus	0,05/0,1 mm
Kriittinen taivutushalkaisija vedossa	25 mm
Kriittinen taivutushalkaisija puristuksessa	25 mm
Substraatin resistanssi	125 mΩ cm
Substraatin magneettiset ominaisuudet	Epämagneettinen
Vasteaika	< 1 ms
Minimi kriittinen virta	≥ 240/200 A @ 77 K
I <sub>C</sub> tasaisuus	< 10 %

SF12050 ja SF12100 eroavat toisistaan ulkoisilta mitoiltaan. Leveys on kummallakin 12 mm, mutta SF12100:n substraatin paksuus on kaksinkertainen SF12050:aan verrattuna, kun taas sen maksimipituus jää puoleen. Substraattina käytetään Hastelloy-metalliseosta.

## 5.2. $\text{MgB}_2$ -suprajohde

Magnesiumdiboridi ( $\text{MgB}_2$ ) kiinnostaa sen yksinkertaisuuden ja edullisuuden takia. Sen kriittinen lämpötila on suhteellisen korkea, 39 K, vaikkakin typen kiehumispisteen alapuolella. Kuitenkin kehitys jäähdytysjärjestelmissä mahdollistaa  $\text{MgB}_2$ :n käytön, sillä nykyiset kryojärjestelmät pystyvät tarvittaviin lämpötiloihin. Eräs materiaalin hyvä ominaisuus on suhteellisen korkea virrantiheys, jota on mitattu niin bulkinäytteissä kuin lämpökäsittelimättömissä rautapinnoitetuissa johteissakin. [67]

Magnesiumdiboridia tutkitaan yhä voimakkaasti, ja useita projekteja materiaalin kehittämiseksi on käynnissä.  $\text{MgB}_2$ :n douppaamista tutkitaan laajasti, sillä sen avulla saadaan kehitettyä aineen ominaisuuksia. Tutkimuksia on tehty muun muassa piikarbidilla, jonka avulla saadaan  $\text{MgB}_2$ :n kriittistä virrantiheyttä kasvatettua. [68]

SCFCL-järjestelmissä  $\text{MgB}_2$ :sta voidaan käyttää muun muassa induktiivisen vikavirranjohtimen sylinterin materiaalina. Tällöin asetetaan useita ohuita suprajohteista valmistettuja sylintereitä sisäkkäin. Kuitenkin perinteisempi tapa valmistaa induktiivinen vikavirranrajoitin on tehdä  $\text{MgB}_2$ -käämi rautasydämen ympärille. Useita  $\text{MgB}_2$ -suprajohdemateriaalia hyödyntäviä FCL-prototyyppejä on suunniteltu viimeisten vuosien aikana, muun muassa italialaisen LIMSAT-projektin yhteydessä. Kyseisen projektin prototyyppien mittauksissa saatiin tyydyttäviä tuloksia esimerkiksi kriittisen virtojen ja virrankuljetuksen osalta. LIMSAT-projektissa jäähdytykseen käytettiin sekä nestemäistä heliumia että nestemäistä neonia, sekä Stirling-tyyppistä kryojäähdytintä.



Kuva 30: Kolme  $\text{MgB}_2$ -suprajohteesta valmistettua FCL-prototyyppeä. [69]

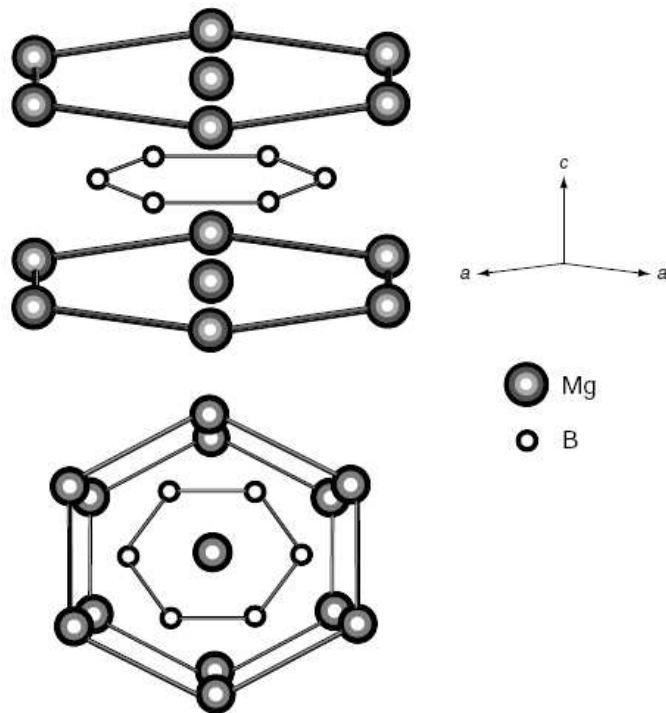
### 5.2.1. $\text{MgB}_2$ -suprajohteen ominaisuudet ja rakenne

Taulukossa 10 on listattu muutamia  $\text{MgB}_2$ :n ominaisuuksia tyypillisessä käyttölämpötilassa. Kriittinen virrantiheys on määritelty SiC-doupatun magnesiumdiboriditeipin mukaiseksi. Ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus on laskettu tyypillisen käyttölämpötilan mukaisesti 20 Kelvinissä.

*Taulukko 10:  $\text{MgB}_2$ :n ominaisuuksia.*

<i>Ominaisuus</i>	<i>Arvo</i>
Kriittinen lämpötila	n. 39 K
Kriittinen virrantiheys	$2,4 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$ (20 K, 2 T) [68]
Resistiivisyys normaalitilassa	$2,3 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$ (keskiarvo) [70, 71]
Ominaislämpökapasiteetti	$5,85 \cdot 10^4 \text{ J/m}^3\text{K}$ (20 K) [70]
Lämmönjohtavuus	$4,952 \text{ W/mK}$ (20 K) [70]

Magnesiumdiboridin valmistaminen erilaisiksi tuotteiksi on vaativaa, sillä materiaali on erittäin haurasta ja kovaa. Sen kiderakenne on hyvin yksinkertainen. Materiaalin muodostaa kuusikulmainen kenno.  $\text{MgB}_2$ :n kiderakenne on rakentunut siten, että kuusikulmaiset magnesiumtasot vuorottelevat hunajakennon muotoisten boorikerrosten kanssa. Boorikerrokset määrittelevät yhdisteen sähköiset ominaisuudet.



*Kuva 31: Magnesiumdiboridin rakenne. [72]*

Magnesiumdiboridin suprajohtavuus on hyvin vahvasti riippuvainen sen toteutuksesta. Ohutkalvo- ja johdinmuodossa  $\text{MgB}_2$  pystytään muokkaamaan paljon tehokkaammaksi suuremmissa magneettikentissä. Tämän hetkinen korkein tunnettu magneettikentän arvo on noin 60 Teslaa, joka on saavutettu ohutkalvojen avulla. Nykyiset johtimet pystyvät virrantiheyksissä noin  $10 \text{ kA/cm}^2$  13 Teslan magneettikentässä. Tutkimuksia tehdään maailmanlaajuisesti, jotta  $\text{MgB}_2$ :n ominaisuuksia pystyttäisiin yhä parantamaan. [69]

### 5.2.2. $\text{MgB}_2$ -johdinten valmistajat ja tuotteet

$\text{MgB}_2$ -johteiden valmistus ei vielä ole kovinkaan yleistä, mutta muutamia eri tuotteita markkinoilta löytyy. Kaksi merkittävintä  $\text{MgB}_2$ -johtimien valmistajaa maailmassa ovat italialainen Columbus Superconductors ja yhdysvaltalainen Hypertech. Seuraavassa tutkitaan lähemmin markkinoilla olevia magnesiumdiboridista valmistettuja suprajohteita.

#### Columbus Superconductors SpA

Columbus Superconductors SpA valmistaa  $\text{MgB}_2$ -tuotteita AC- ja DC-sovelluksiin. Tuotteet valmistetaan teipeiksi ja erimallisiksi johtimiksi. Columbuksen johtimissa  $\text{MgB}_2$ -säikeet on upotettu rauta/nikkeli-matriisiin, ja lisäksi johtimen poikkipinnalta löytyy stabiloivaa kuparia. Tyypillinen yksikköpituus on 1 – 5 km asiakkaan tarpeen ja johtimen muodon mukaan. Pyöreät ja kulmikkaat johtimet toimivat parhaiten magneettikentässä, kun taas teipeillä on luonnollisesti parempi taivutussäde. Valmistajan  $\text{MgB}_2$ -teipilleen lupaamia arvoja esitellään taulukossa 11.

*Taulukko 11: Columbus Superconductors SpA:n  $\text{MgB}_2$ -johteen ominaisuuksia.[69]*

Ominaisuus	Arvo
Johtimen pinta-ala	$3,6 \times 0,65 \text{ mm}^2$
$I_c$ (30 K)	460 A
$I_c$ (20 K, 1 T)	380 A
$I_c$ (16 K, 1 T)	500 A

#### Hyper Tech Research, Inc

Hyper Tech Research Inc. valmistaa monifilamenttijohteita, joiden yksikköpituus on 1 – 4 km. Yritys valmistaa tarpeen mukaan sekä pyöreitä että kulmikkaita johteita, ja tuotteet soveltuvat muun muassa MRI-laitteisiin ja SCFCL-käyttöön. Taulukossa 12 on listattu valmistajan  $\text{MgB}_2$ -johteen ominaisuuksia.

Taulukko 12: Hyper Tech Research Inc. MgB<sub>2</sub>-johteen ominaisuuksia.[73]

<i>Ominaisuudet</i>	<i>Arvo</i>
Johtimen halkaisija	0,7 – 0,9 mm
Filamenttien määrä	7 ja 19
Lämpökäsittelyn asteluku/aika	700 °C/20 min
Kriittinen virrantiheys	1750 A/mm <sup>2</sup> (20 K, 2T)
Suprajohteen osuus johteesta	13 – 18 %
Sallittu pitkittäinen venymä	0,35 %
Yksikköpituus	1 – 4 km

### 5.3. SCFCL:n HTS-moduulin suunnittelu

Työssä suunnitellaan kaksi suprajohtavaa vikavirranrajoitinta: resistiivinen vikavirranrajoitin, jossa hyödynnetään 2G-johdinta, ja induktiivinen vikavirranrajoitin, jossa käytetään MgB<sub>2</sub>:sta valmistettua suprajohdemagneettia. Suunnittelussa hyödynnetään aikaisemmassa kappaleessa kiinnitettyjä lähtöarvoja, jotka määrittelevät vikavirranrajoittimen ominaisuudet.

#### 5.3.1. Resistiivinen 2G SCFCL

Resistiivisen vikavirranrajoittimen rakenne on yksinkertainen. Siinä vikavirran sattuessa suprajohtava materiaali siirtyy nopeasti normaalitilaan pakottaen näin virran kulkemaan rinnalla olevan resistanssin kautta. Näin vikavirta rajoittuu halutulle tasolle eikä vahinkoja pääse tapahtumaan. Tavoitteena on tarkastella kuinka pitkä matka johdinta tarvitaan, jotta saadaan haluttu vikavirranrajoitusominaisuus. Suunnittelussa lasketaan aikaisemmin valitun jännitetasoisen oikosulkujännitteen aiheuttama virta, kun otetaan huomioon lämpötilan nousu suprajohteessa. Tämän lisäksi arvioidaan palautumisaikaa normaalitoimintatilaan vian tapahduttua.

Suprajohteen pituus vaikuttaa kahteen asiaan, virranrajoituskykyyn ja termiseen stabiilisuuteen. Kun halutaan tietty virranrajoitus, johtimen minimipituus voidaan laskea kaavalla (2). Pituus riippuu suprajohtimen ominaisuuksista:

$$l_{\min} = R_{\lim} \left( \frac{A_{SC}}{\rho_{SC}} + \frac{A_{ST}}{\rho_{ST}} + \frac{A_{SU}}{\rho_{SU}} \right) \quad (2)$$

Missä  $\rho_{SC}$  on suprajohteen,  $\rho_{ST}$  stabilointimetallin ja  $\rho_{SU}$  substraatin resistiivisyydet,  $A_{SC}$ ,  $A_{ST}$  sekä  $A_{SU}$  näiden poikkipinta-alat, ja  $R_{\lim}$  rinnakkaisvastuksen resistanssi. Tästä käy hyvin ilmi, miten tärkeää suprajohdetuotteen valinta on suunnittelua ajatellen.

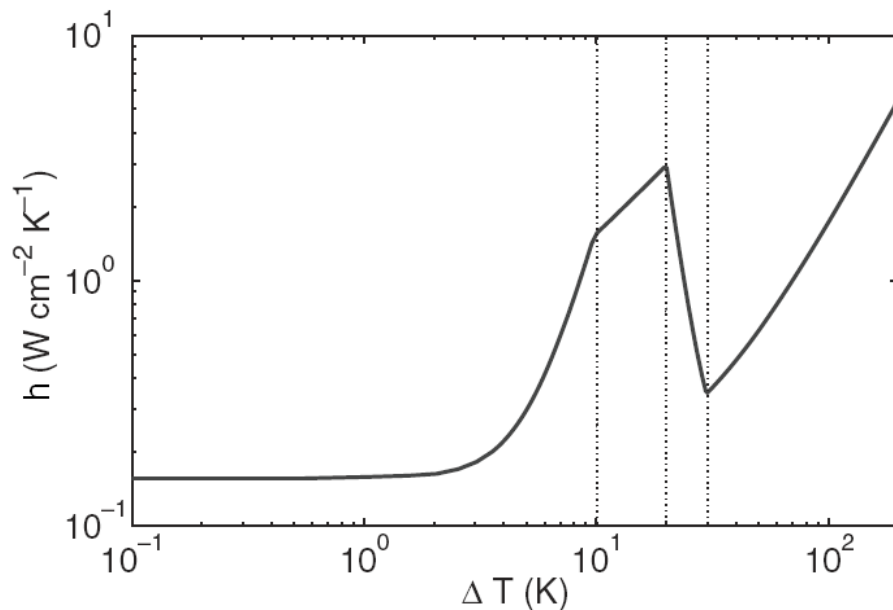
Johtimelle saadaan eri pituus riippuen sen materiaalikerrosten paksuudesta ja käytettyjen materiaalien ominaisuuksista [74].

Edellä tarkastelluista ohutkalvojohtimista valitaan tähän suunnittelutehtävään SuperPower Inc:in valmistama SF12100 sen rakenteen ja ominaisuuksien takia. Kyseinen johdin on 0,105 mm paksu ja 12 mm leveä. Terminen malli, jota mallinnuksessa käytetään, perustuu Fourierin yhtälöihin ja lämpöyhtälöihin. Lämmönjohtumisen yleinen osittaisdifferentiaaliyhtälö on johdettu muotoon:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\frac{U^2}{\rho l^2} A - hp(T - T_\infty)}{AC_p} \quad (3)$$

Missä  $T$  tarkoittaa käyttölämpötilaa  $T_\infty$  ulkopuolen lämpötilaa,  $U$  käyttöjännitettä,  $l$  johtimen pituutta,  $\rho$  sen resistiivisyyttä,  $A$  poikkipinta-alaa,  $h$  lämmönsiirtokerrointa ja  $C_p$  ominaislämpökapasiteettia.

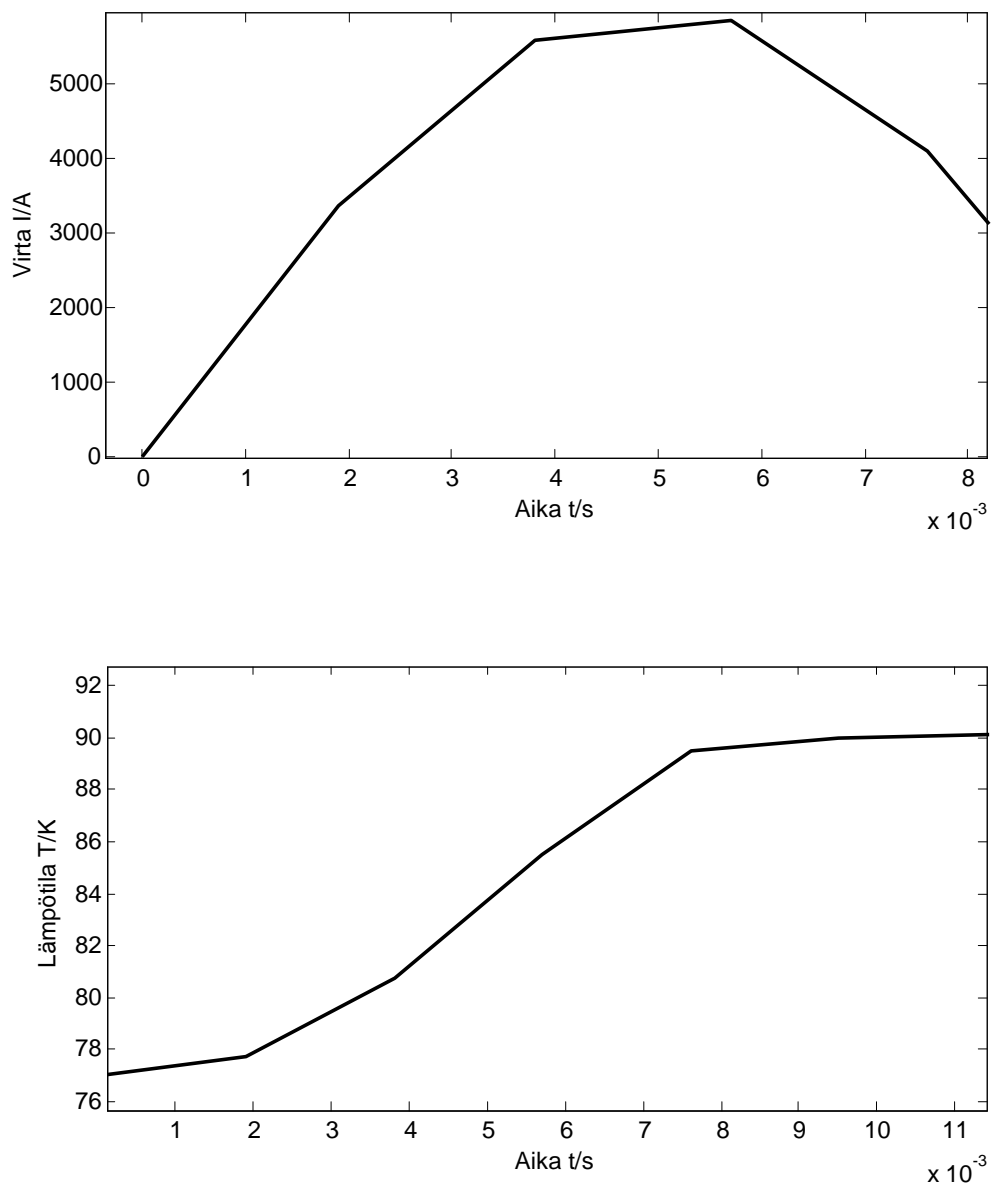
Mallinnuksessa käytettiin seuraavia arvoja. Käyttöjännitteenä käytettiin 11,5 kV, lämpötila johtimen ulkopuolella kiinnitettiin 77 Kelviniin. Mallinnuksessa pyritään löytämään johtimelle pituus  $l$ , joka täyttää halutut virranrajausvaatimukset. Johdinta jäähdytetään nestemäisellä typellä. Käyttölämpötila  $T_{ref}$  on asetettu jo aiemmin 77 Kelviniin ja kriittinen lämpötila  $T_C$  on YBCO:n tapauksessa 90 K. Kyseisessä käyttölämpötilassa  $J_C = 4 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ . Lämmönsiirtokerroin riippuu lämpötilan muutoksesta kuvan 32 mukaisesti. Suunnittelussa käytämme arvoa  $h = 1,5 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2\text{K}$ .



Kuva 32: Nestetyypen kiehumiskäyrä

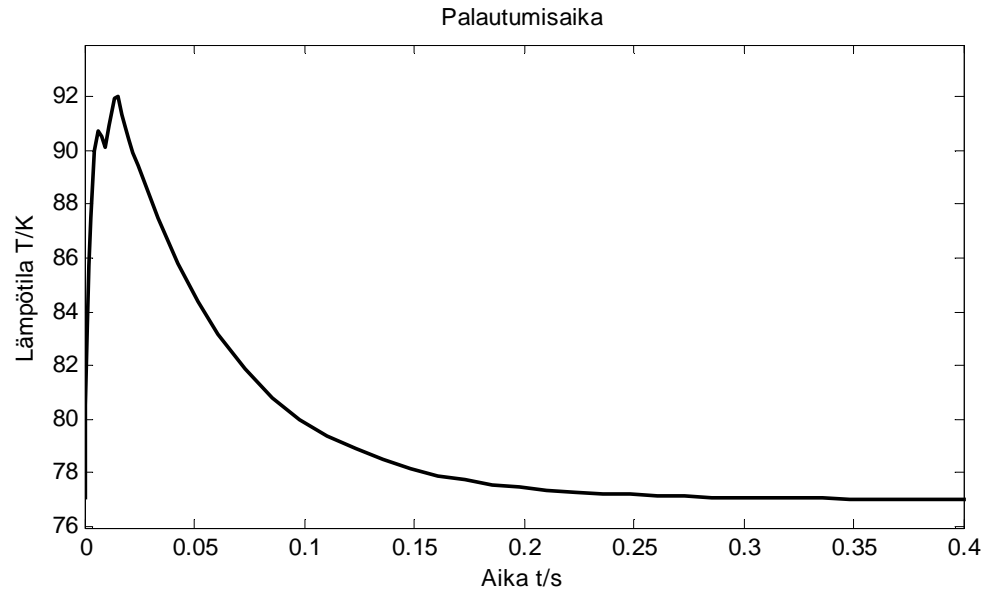


Mallinnuksessa havaittiin, että jotta saadaan aikaiseksi halutut virranrajoitusominaisuudet, on johtimen pituuden oltava erittäin suuri. Tämä tuo hankaluuksia valmistuksessa, sillä YBCO-johdinten yksikköpituus ei ole vielä kehittynyt tarpeeksi, jotta järjestelmä voitaisiin rakentaa ilman johdinliitoksia. Liitokset voivat aiheuttaa suunniteltuun laitteeseen ongelmia pitkällä aikavälillä, ja näin laskea sen luotettavuutta. Mallinnuksessa johtimen riittävä pituus haluttujen ominaisuuksien saamiseksi on 2020 metriä. Kaavan (3) avulla mallinnettiin suoraa johdinta 2D-mallissa, jossa se kuvaa suprajohtavan kelaan käytettävää johdinta. Johdinta mallinnettiin erimittaisena ja tämän avulla pyrittiin tarkastelemaan rajoitetun virran ja johtimen lämpötilan käyttäytymistä.



Kuva 33: Virran ja lämpötilan kuvaajat ajan funktiona.

Kuten kuvasta 33 on nähtävissä, virran noustessa lämpötila suprajohteessa alkaa nousta. Kun virta saavuttaa arvon, johon toiminta halutaan rajoittaa, siirtyy suprajohde normaalitilaan, eli lämpötila nousee kriittisen tason yläpuolelle (90 K), ja näin vikavirranrajoitin alkaa toimia. Simuloineissa saavutettu rajoitetun virran arvo saatiin 5,8 kA:n tasolle, mikä katsottiin riittäväksi rajoitukseksi. Tällöin suprajohde ylitti kriittisen lämpötilan arvon, mikä tarkoittaa sen siirtymistä normaalitilaan.



Kuva 34: SCFCL:n palautumisaika.

Palautumisaikaa mallinnettiin tilanteella, jossa laitteeseen syötetty vikavirta katkaistaan. Kuvasta 34 nähdään lämpötilan muutos virran katkaisun jälkeen. Jos oletetaan, että toimintalämpötilalla tarkoitetaan tässä tilanteessa 77 Kelviniä, havaitaan vikavirranrajoittimen palautuvan toimintalämpötilaan noin 0,4 sekunnin kuluessa. Tätä voidaan pitää hyväksyttävänä arvona. Kuitenkin, jos laitteen toimivuus voidaan taata korkeammallakin lämpötilalla, kuten 80 Kelvinissä, on palautumisaika lyhyempi, noin 0,1 sekuntia. Taulukossa 13 on listattu mallinnuksen pohjalta suunnitellun johtimen ominaisuudet.

Taulukko 13: Vikavirranrajoittimen ominaisuuksia

<b>Ominaisuus</b>	<b>Arvo</b>
Johtimen leveys	12 mm
Johtimen paksuus	0,105 mm
Johtimen pituus	2020 m
Vikavirran huippuarvo	5,8 kA
Rajoittimen palautumisaika	380 ms
Jännitetaso	20 kV
Operointivirta	1 kA
Substraattimateriaali	Hastelloy C-276

Suprajohde on häviötön vain tasavirtakäytössä. Tässä suunnittelussa tutkitussa AC-käytössä tilanne on toinen, koska ajan suhteen muuttuvasta virrasta aiheutuva ajan suhteen muuttuva magneettivuontiheys  $B$  synnyttää sähkökentän Faradayn lain mukaisesti:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

Jossa  $\vec{E}$  on sähkökentän voimakkuus. Muuttuvan magneettikentän kohdistuessa suprajohteeseen, jossa kulkee suuri virrantiheys, seuraa tehohäviöitä. Näitä häviöitä kutsutaan AC-häviöiksi. Yksi suurimmista kehityskohteista suprajohteiden saralla onkin juuri näiden vaihtovirtahäviöiden pienentäminen. Niitä ei voida kokonaan poistaa, mutta valmistusteknisillä yksityiskohdilla niitä voidaan pienentää. SCFCL koostuu useista käämikierröksistä, ja kierrosten lisääntyessä AC-häviöt pienenevät, koska rakenteen alemmat kierrokset ovat näin suojassa magneettivuolta. Lisäksi teippien kierrosten välimatkan kasvattaminen kasvattaa häviöitä. [91]

### 5.3.2. Induktiivinen MgB<sub>2</sub> SCFCL

Suunnittelun kohteena on induktiivinen vikavirranrajoitin, jossa magnesiumdiboridista valmistetulla magneetilla ajetaan rautasydän saturaatioon. Vikatilanteen sattuessa analysoidaan miten rautasydän palautuu saturaatiosta. Analyysissä tutkitaan, miten virtaa rajoitetaan ja hystereesihäviöitä syntyy rautasydämeen voimakkaan induktanssin kasvun johdosta. Oletuksena suunnittelussa on, että rautasydän on riittävästi jäähdytetty, esimerkiksi ilmalla tai öljyllä. Suunnitellulle magneetille tehdään quench-analyysi mahdollisia vikatilanteita varten.

Koska virta pitää rajoittaa molemmille polariteeteille, on rajoittimessa oltava kaksi rautasydäntä ja AC-käämiä. Rautasydän on tärkeä osa vikavirranrajoitinta. Sen koko on verrannollinen käytettävien käämikierrosten määrään. Amperen lain mukaan:

$$\frac{dH_1}{dt} = -\frac{w_c}{l} \frac{di}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{w_c}{l} \frac{di}{dt} \quad (6)$$

Missä  $w_c$  on käämin kierrosten määrä ja  $l$  rautasydämen magneettinen pituus. Lisäksi tiedetään, että:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (7)$$

Missä  $M$  kuvaa magnetoitumaa. Faradayn induktiolaista voimme laskea ensimmäisen AC-käämin sähkömotoriseksi voimaksi:

$$\begin{aligned}
 e_1 &= w_c \frac{d\phi}{dt} = w_c A \frac{dB}{dt} \\
 &= \mu_0 w_c A \frac{d(H_1 + M_1)}{dt} \\
 &= \mu_0 w_c A \frac{dH_1}{dt} \left( 1 + \frac{dM_1}{dH_1} \right) \\
 &= -\frac{\mu_0 w_c^2 A}{l} \frac{di}{dt} \left( 1 + \frac{dM_1}{dH_1} \right) \\
 &= -L \frac{di}{dt} \left( 1 + \frac{dM_1}{dH_1} \right) \quad (8)
 \end{aligned}$$

Tästä saadaan AC-käämien 1 ja 2 jännitteiden arvoiksi:

$$u_1 = -e_1 = L \frac{di}{dt} \left( 1 + \frac{dM_1}{dH_1} \right) \quad (9)$$

$$u_2 = -L \frac{di}{dt} \left( 1 + \frac{dM_2}{dH_2} \right) \quad (10)$$

Kirchhoffin jännitelain mukaan järjestelmän käyttöjännitteelle saadaan edellä olevien kaavojen mukaisesti:

$$V_s(t) = L \frac{di}{dt} \left( \frac{dM_1}{dH_1} - \frac{dM_2}{dH_2} \right) + iR \quad (11)$$

Missä  $R$  on kuorman resistanssi. Kaavasta (11) saadaan:

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_s(t) - iR}{L \left( \frac{dM_1}{dH_1} - \frac{dM_2}{dH_2} \right)} \quad (12)$$

Voidaan olettaa, että  $M_1 = M_2$  ja  $H_1 = H_2$ , jolloin kaava yksinkertaistuu muotoon:

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_s(t) - iR}{L} \quad (13)$$

Missä induktanssi  $L$  on siis:

$$L = \frac{\mu_0 w_c^2 A}{l} \quad (14)$$

Induktanssin kaava (14) voidaan sijoittaa edellä olevaan kaavaan (13), jolloin voidaan esittää mallinnuksessa käytettävä kaava (15):

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_s(t) - iR}{\frac{\mu_0 w_c^2 A}{l}} \quad (15)$$

Faradayn induktiolain mukaan AC-käämiin indusoituva jännite on:

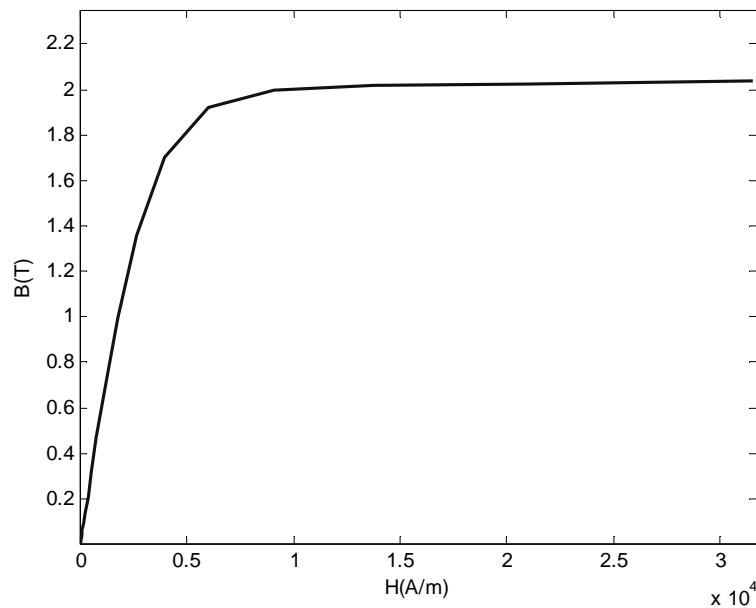
$$E = 4,44 f w_c B_m A \quad (16)$$

Jos oletetaan, että käämissä tapahtuva jännitteenalenema on 50 %, kierrosten lukumäärä voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$w_c = \frac{U_e}{8.88 f B_m A} \quad (17)$$

Jossa  $U_e$  on käytetty jännite,  $f$  on taajuus ja  $B_m$  magneettivuon tiheyden maksimi.

Rautasydämen materiaali on tyypillistä magneeteissa ja muuntajissa käytettyä piiterästä (Fe 96 Si 4). Sen suurin magneettivuon tiheys on 2 T, ja sen suhteellinen permeabiliteetti alussa on noin 500. Kuvassa 35 esitetään sydämen magnetisaatiokäyrä.

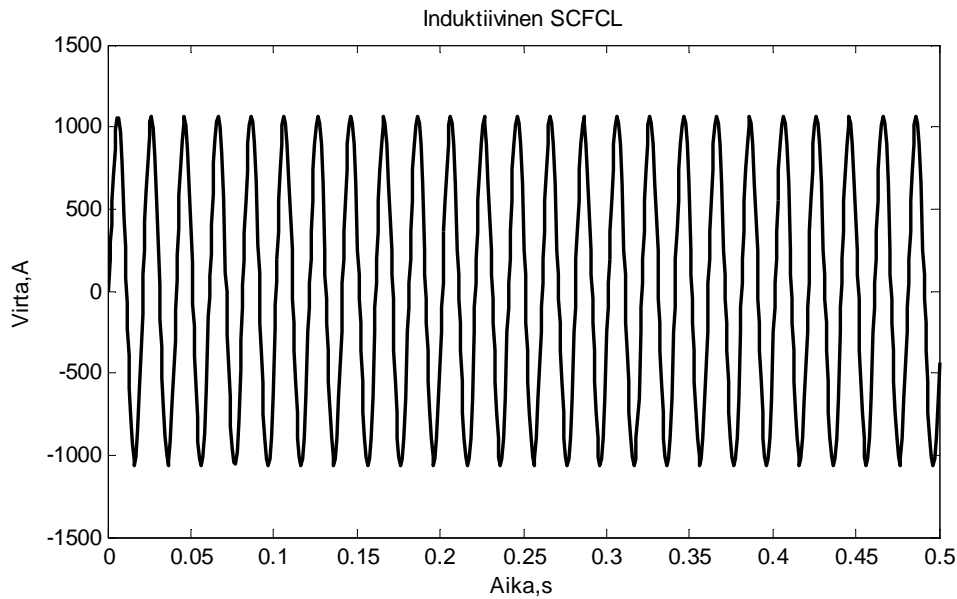


Kuva 35: Rautasydämen  $B$ - $H$  –käyrä.

Mallinnuksessa käytettiin kaavaa (15), jonka avulla pyrittiin löytämään sekä rautasydämen pinta-alalle että käämin kierrosluvulle virranrajoitusominaisuuksien kannalta optimaaliset arvot. Jännitteenä käytettiin 11,5 kV, kuorman resistanssina käytettiin normaalitilassa  $10 \Omega$  ja vikatilanteessa  $0,1 \Omega$ . Tyhjiön permeabiliteetti  $\mu_0$  on  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Tm/A. Mallinnuksessa ja virranrajoitusominaisuuksien kannalta vikavirranrajoittimen rautasydämen mitat ovat hyvin tärkeitä. Sydämen poikkipinta-alaksi  $A$  mallinnettaessa saatiin  $0,027 \text{ m}^2$ . Tämän arvon avulla voidaan laskea tarvittavien AC-käämin kierrosten määrä. Edellä olevasta kaavasta saadaan kierrosmääräksi  $w_c = 483$ .

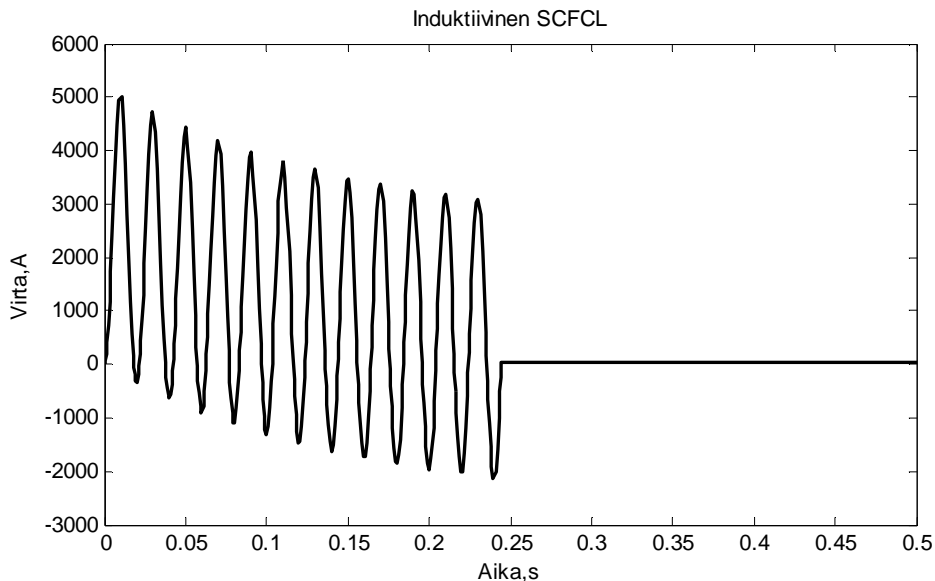
Jos havaitaan, että rajoitettava virta ei ole tarpeeksi alhainen, AC-käämin kierrosmäärää voidaan nostaa. Tämä voi kuitenkin johtaa siihen, että rautasydämen poikkileikkausala pitää myös kasvattaa, jotta vältetään sydämen uudelleensaturoitumiselta.

Simuloidaan suprajohtavaa vikavirranrajoitinta. Kuvassa 36 nähdään SCFCL:n virta, kun verkossa ei ole vikatilannetta.



Kuva 36: Simuloitu virta normaalikäyttötilanteessa.

Vikatilanteen sattuessa mallinnettu suprajohdava vikavirranrajoitin rajoittaa virran kasvua yli halutun arvon ja näin estää laitteiden vioittumista. Kuvasta 37 voimme nähdä mitoituksen olevan haluttujen ominaisuuksien kaltainen. Mallinnuksessa syötettävä vikavirta katkaistaan 0,25 s jälkeen.



Kuva 37: Mallinnettu vikavirranrajoitin vikatilanteessa.

Vian jälkeen virta nousee maksimiarvoonsa 5 kA:iin, ja alkaa laskea lähes välittömästi SCFCL:n impedanssin johdosta. Mallinnuksessa simuloitiin siis verkon kuormaa  $0,1 \Omega$  vastuksella oikosulkuutilanteessa. Koska vianaikainen resistanssi on näin pieni, ilman SCFCL:iä vikavirta olisi huomattavasti suurempi. Taulukkoon 14 on koottu mallinnuksessa käytettyjä arvoja.

Taulukko 14: Induktiivisen SCFCL:n ominaisuuksia.

<i>Ominaisuus</i>	<i>Arvo</i>
Rautasydämen poikkileikkausala	0,027 m <sup>2</sup>
Magneettinen keskipituus	56 cm
AC-käämin kierrosmäärä	483
Käytettävä jännitetaso	20 kV
Virta käyttötilanteessa	1 kA
Maksimi häiriövirta	5 kA

Kuten edellä on käynyt selväksi, induktiivinen suprajohtava vikavirranrajoitin alkaa rajoittaa virtaa jo ennen kuin suprajohtava materiaali siirtyy normaalitilaan (ns. quench), ja ideaalitilanne onkin, ettei laite siirry pois suprajohtavasta tilasta lainkaan toimintansa aikana. Täten voidaan taata järjestelmän toiminta lähes välittömästi vian jälkeen, eikä erillistä jäähtyksen tarvitsemaa palautumisaikaa tarvita. Tämä on mahdollista vain silloin, jos laitteen induktanssi vikatilanteessa on tarpeeksi korkea. Käytännössä kuitenkin myös induktiivinen vikavirranrajoitin siirtyy normaalitilaan vian sattuessa, sillä tarvittavaa induktanssia ei saavuteta hyväksyttävillä kustannuksilla ja koolla. Suprajohteessa lämmön nousun takia hukattua tehoa voidaan arvioida seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 P &= \left( \frac{I_d}{N} \right)^2 (w_c^2 R_s) = (I_d)^2 R_s \\
 &= \frac{(m C_p \Delta T_R)}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Missä  $m$  on suprajohteen massa,  $I_d$  suprajohteen läpi kulkeva virta,  $\Delta T_R$  on lämpötilan nousu  $\Delta t$ :n aikana ja  $\Delta t$  on quenchiin kuluva aika. Tästä voidaan johtaa ajalle kaava:

$$\Delta t = \frac{\Delta T_R R_s m C_p w_c^2}{(u_1)^2} \tag{19}$$

Tämän kaavan avulla voidaan approksimoida suprajohteen quenchiin kuluva aika ja näin selvittää tarkemmin sen käyttäytymistä vian aikana. Itse analysointi on vaativaa ja suprajohteen ja SCFCL:n toimintaa on vaikea vielä tarkkaan mallintaa laskennallisesti ilman suuria yksinkertaistuksia.[89]



## 6. TEKNISTALOUELLINEN ANALYYSI

Tässä luvussa tarkastelemme SCFCL:n valmistuksesta ja käytöstä aiheutuvia kustannuksia, ja tutkimme järjestelmän luotettavuutta. Lopuksi vertailemme SCFCL-laitetta perinteisiin vikavirranrajoitinratkaisuihin.

### 6.1. Kustannukset

Kustannukset voidaan jakaa valmistus-, ylläpito-, ja huoltokustannuksiin. Valmistuksessa käytettävien suprajohdemateriaalien hinta on vielä tällä hetkellä korkea. Myös järjestelmän käytössä tarvittava infrastruktuuri vaatii kehitystä.

Suprajohdemateriaaleja ei ole järkevää verrata metrihinnoilla, koska eri johtimien suoritusarvot eroavat niin huomattavasti toisistaan. Tämän takia hintavertailussa käytetään yleensä yksikkönä €/kAm). Vertaillaan siis minkä verran maksaa metrin mittainen osa sellaista suprajohdinta, joka kykenee kuljettamaan 1000 A:n virran. Luonnollisesti johteiden hinnat kehittyvät jatkuvasti, mutta jotain arvioita voidaan kuitenkin antaa. YBCO-ohutkalvojohtinten hintatavoitteeksi on asetettu 4 – 7 €/kAm, mutta tämä tavoite on vielä kaukana. Tällä hetkellä hinta liikkuu yli kaksinkertaisissa lukemissa. [84]  $\text{MgB}_2$ :n suurimpana etuna muihin suprajohdeisiin nähden on pidetty sen edullista hintaa. Sen tavoitehintana on pidetty 1 – 2 €/kAm.

Ylläpitokustannuksista suurimman osan vie jäähdytyksen kunnossapito. Jäähdytyksen kustannukset riippuvat käytetystä lämpötilasta. Sama lämpökuorma aiheuttaa kymmenkertaiset jäähdytyskustannukset riippuen siitä, onko käyttölämpötila 4 K vai 77 K. [21]

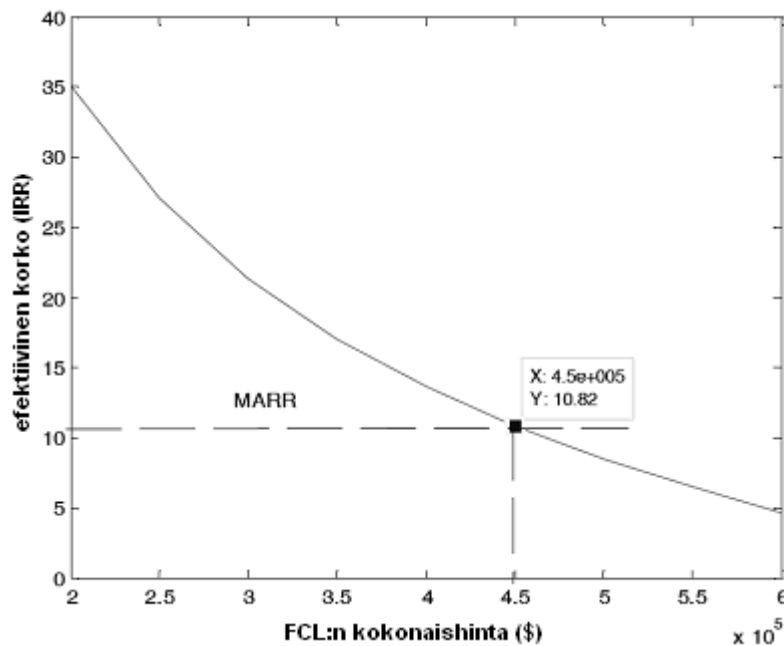
Suprajohtavista vikavirranrajoittimista ei ole tehty suurta määrää kustannus-hyötyanalyysijä, mutta markkinatutkimusten [85] mukaan voidaan päätellä, että SCFCL:stä ollaan valmiita maksamaan enemmän kuin perinteisistä virranrajoitinjärjestelmistä sen tuomien etujen takia.

Minkä tahansa vikavirranrajoittimen asennuksella sähköverkkoon pitää olla tarpeeksi korkea taloudellinen soveltuvuus, ts. sen pitää olla kannattava investointi. Tavanomainen laskutapa tälle riskille on

$$\text{Riski} = \text{seuraus} \times \text{todennäköisyys}. \quad (20)$$

Kaavassa seurauksella tarkoitetaan rikkoontumisesta aiheutuvaa kustannusta. Vikavirranrajoittimen aiheuttamia kustannuksia ja sen tuomia hyötyjä voidaan verrata monella tavalla, kuten taloudessa käytettävillä tunnusluvuilla. M. R. Haghifam et al.

kertovat artikkelissaan [86] vikavirtarajoittimien kustannusanalyysistä. Efektiivinen korko (IRR) on menetelmä, jolla voidaan mitata investoinnin, eli tässä tapauksessa FCL:n, sijoitustuottoa. Projekti on siis hyvä sijoitus, jos sen IRR on suurempi kuin muilla sijoituksilla olisi saavutettavissa. Kuvassa 39 olevassa käyrässä on verrattu FCL:stä aiheutuvia valmistuskustannuksia järjestelmän efektiiviseen korkoon, ts. sen tuomaan hyötyyn. Jos asetetaan raja-arvoksi, eli pienimmän hyväksyttävän koron, ts. riittävän hyödyn arvoksi (Minimum Attractive Rate of Return, MARR) tässä tapauksessa 10,82 % [86], voidaan havaita, että jotta FCL saavuttaa riittävän hyödyn on valmistuskustannusten pysyttävä alle 450000 dollarin.

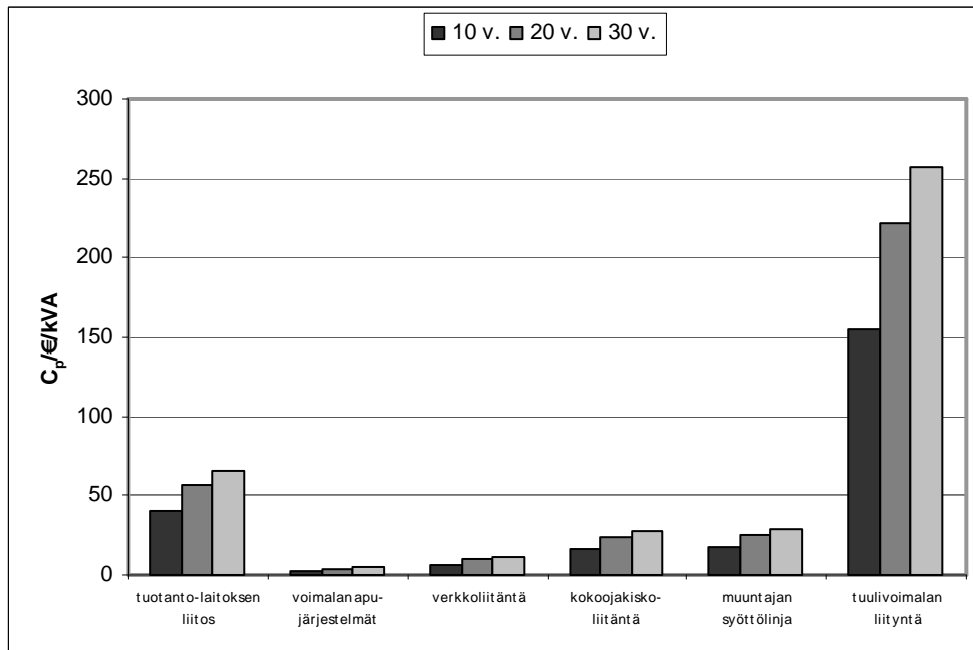


Kuva 39: Virranrajoittimen hinta suhteessa IRR:iin.

Tästä voidaan päätellä, että vikavirranrajoitin on taloudelliselta kantilta katsottuna kannattava, sillä voidaan olettaa vikavirranrajoitinten valmistuksen olevan kustannusanalyysissä laskettua lukua halvempaa.

Kun verrataan SCFCL:n käyttökohteita, saadaan parempi kuva siitä, minkälaisiin kohteisiin kyseinen järjestelmä on taloudellisesti järkevää sijoittaa. Verrattaessa muutamaa erilaista tilannetta, huomataan, että tuulivoimalat ovat yksi kannattavimmista käyttökohteista. Taulukossa 15 tarkastellaan järjestelmän tuomaa taloudellista hyötyä kymmenen, 20 ja 30 vuoden jälkeen. Siinä on tutkittu suprajohtavan vikavirranrajoitinjärjestelmän hankinta-arvoa  $C_p/\text{€}/\text{kVA}$ , jonka mukaan voidaan päätellä taloudellisesti hyviä käyttökohteita. Tuulivoimalakäytössä SCFCL on tutkimuksen mukaan kannattava järjestelmä verrattuna perinteisiin teknologioihin, kunhan häviö- ja elinikäodotukset saavutetaan.[87]

Taulukko 15: SCFCL:n hankinta-arvo eri kohteissa.[87]



On hankala arvioida SCFCL-järjestelmän oikeaa hintaa, vaikkakin oletettaisiin käyttökohteeksi tulevaisuudessa yleistyvät merituulivoimalat. Olisi tiedettävä tarkasti asennuksella saavutettavat hyödyt, ennen kuin voidaan laskea laitteelle hyväksyttävä hinta ja käyttökustannukset. Järjestelmän luotettavuus ja hyvät käyttökokemukset ovat ensiarvoisen tärkeitä, mikäli halutaan, että SCFCL valitaan merituulivoimalan virranrajoitinlaitteeksi. On hyvä kuitenkin muistaa, että myös merituulivoimaloiden tekniikka on tietyltä osin uutta ja olisikin järkevää suunnitella SCFCL osaksi merituulivoimalan kokonaisjärjestelmää juuri halutut ominaisuudet ja riskit huomioon ottaen.

## 6.2. Luotettavuus

Suprajohtavan vikavirranrajoittimen perusajatus on parantaa sähköverkon luotettavuutta. Jotta tämä pystytään saavuttamaan, on itse järjestelmän oltava luotettava. Mikä tahansa suprajohtava järjestelmä sähköjakeluverkossa tarvitsee hyvin luotettavan jäähdytysjärjestelmän. Tekniikka kryojärjestelmissä on jo hyvin kehittyntä ja luotettavaa, ja niiden keskimääräinen vikaantumisväli on jo hyvin korkea. Vikoja, joita jäähdytyslaitteissa voi esiintyä ovat erilaisten ainejäämien aiheuttamat ongelmat ja tiivisteviat.

SCFCL:n käyttöönotto vaatii varsinkin käsittelemässämme offshore-tuulivoimaloissa korkeaa luotettavuutta. Lisäksi pitää muistaa, että perinteisillä järjestelmillä on erittäin hyvä maine. Tämä tarkoittaa, että uusien järjestelmien, kuten SCFCL:n pitää osoittaa

samantasoista, ellei parempaa, luotettavuutta kuin jo hyväksi havaitut järjestelmät, jotta niitä halutaan harkita käytettäväksi.[87]

Luotettavuus riippuu myös käytettävästä SCFCL-tyypistä, sillä tehoelektroniikkakomponentteja hyödyntävät laitteet eivät ole täysin luotettavia. Nämä kyseiset järjestelmät eivät rajoita vikavirtaa, jos jokin näistä komponenteista on epäkunnossa.

### 6.3. Vertailu

Jotta pystyttäisiin valitsemaan oikeanlainen vikavirranrajoitin, on vertailtava olemassa olevia SCFCL-tyyppejä ja tutkittava mikä niistä on soveltuva käsiteltävään käyttökohteeseen. Ville Tuominen on diplomityössään [85] tutkinut eri järjestelmiä ja niiden hyviä ja huonoja ominaisuuksia. Tutkimuksessa todetaan, että mikään SCFCL-järjestelmä ei ole ylivoimaisesti paras ominaisuuksiltaan, eikä sitä mikä olisi yleisesti virranrajoitintyyppi, joka toimisi jokaisessa järjestelmässä. Vertailussa on mukana kahdeksan eri tyyppiä, joista osa on esitelty tässä työssä aikaisemmin. Nämä tyypit on listattu taulukossa 16. Taulukon merkinnät: +++ = vahvuus, ++ = keskiverto, + = heikkous.

*Taulukko 16: SCFCL-tyyppien ominaisuuksien vertailu[85]*

	<i>Koko</i>	<i>Suprajohteen määrä</i>	<i>Palautumisaika</i>	<i>Luotettavuus</i>	<i>Häviöt</i>	<i>Hinta</i>	<i>Kehitysaste</i>
Resistiivinen	+++	++	+	+++	++	+++	+++
Induktiivinen	+	++	+	+++	++	++	++
Vuolukko	+	++	+	+++	++	++	+
Siltatyyppi	++	++	+++	+	+	++	++

Taulukosta 16 voidaan todeta, että resistiivinen vikavirranrajoitin on kooltaan pienin, kun taas rautasydämiä hyödyntävät järjestelmät ovat suurikokoisimpia. Tärkeät ominaisuudet, kuten palautumisaika ja luotettavuus ovat hyvin tasaisia eri konseptien välillä, mutta on todettava, että järjestelmät, joissa suprajohte ei siirry normaalitilaan toiminnan aikana ovat muita nopeampia palautumisessa. Järjestelmien aiheuttamien häviöiden määrässä ei myöskään tule suuria eroja. Resistiivinen SCFCL on hinnaltaan vertailun edullisin valmistaa ja se on myös tällä hetkellä kehittynein ratkaisu.

Pitää muistaa, että jokaisessa tilanteessa SCFCL ei ole ainut ratkaisu vikavirtojen rajoittamiseen. Verrattaessa suprajohtavia vikavirranrajoittimia yleisesti muihin, perinteisiin vikavirranrajoitinjärjestelmiin, on mietittävä mitkä ovat tärkeimmät verrattavat ominaisuudet. Esimerkkinä perinteisistä järjestelmistä voidaan ottaa tyristoreilla toteutettu virranrajoitin. Tarkasteltaessa häviöitä tyristorijärjestelmä pääsee noin 0,05 % tehohäviötasoon, ja hankintakustannukset ovat noin 30000 €. Kehitettävän SCFCL:n pitäisi siis pystyä samaan.[87] Ehkä yksi tärkeimmistä ominaisuuksista, mikä

SCFCL:llä on, on sen tuoma verkon ja siinä olevien laitteiden eliniän kasvattaminen. Koska virranrajoittimen takia laitteet säästyvät suurilta ylivirroilta, ne kestävät aikaisempaa pidempään ja näin voidaan säästää laite- ja huoltokustannuksissa.

## 7. YHTEENVETO

Hajautetun energiantuotannon kasvu jatkuu vahvana. Kyseiseen tuotantoon katsotaan kuuluvan uusiutuvat energiantuotantotavat, joten tulevaisuudessa hajautettujen tuotantolaitosten, kuten aurinko-, biokaasu- ja tuulivoimaloiden määrän odotetaan kasvavan merkittävästi. Tällä hetkellä teknologioista kilpailukykyisimpinä voidaan pitää vesivoimaa ja tuulivoimaa, mutta rajoituksena niiden määrän kasvulle ovat olleet erilaiset vesistönsuojelu- ja maankäyttörajoitukset. Näiden takia tuulivoimaa pidetäänkin tulevaisuudessa vesivoimaa paljon parempana vaihtoehtona.

Tällä hetkellä on maailmalla menossa eräänlainen tuulivoimalabuumi, sillä uusia tuulipuistohankkeita käynnistetään jatkuvasti. Myös Suomessa tuulipuistohankkeita on vireillä useita, ja osa niistä, suunnitelmista suurimmat, koskevat merituulipuistoja. Tuulipuiston rakentaminen merelle vähentää tuotantolaitosten ihmisille ja luonnolle aiheuttamia rasitteita, kuten melua ja vilkuntaa sekä ulkonäöllisiä haittoja. Koska voimalan rakentaminen merelle on uusi tekniikan ala, erilaisia ongelmia pitää ratkaista ennen kuin teknologiaan voidaan luottaa täydellisesti. Vikavirtoihin on syytä kiinnittää erityistä huomiota, sillä ne voivat kasvaa erittäin suuriksi. Lisäksi merituulivoimaloiden yhteydessä luotettavuus on tärkeä seikka. Luotettavuus tulee tärkeäksi juuri voimaloiden sijainnin takia. Kauas merelle on hankalampaa lähettää korjaaja kuin maalla tai tunturilla sijaitsevalle voimalalle. Tästä syystä myös rajoitinten on syytä palautua vian tapahtuttua takaisin normaaliin käyttötilaan. Siksi suprajohtavat vikavirranrajoittimet ovat mielenkiintoinen tutkimusala.

Lupaavimpia vikavirranrajoitinkonsepteja näyttäisi olevan resistiivinen SCFCL sen pienen koon ja yksinkertaisuuden takia. Tämän takia sitä onkin tutkittu eniten, ja kehitystyö on jo hyvin pitkällä. Suprajohtava induktiivinen vikavirranrajoitin on kiinnostava konsepti sen nopeuden takia. Sen suuri koko on kuitenkin haittapuoli, joka voi olla kyseisen konseptin kompastuskivi. Suprajohtavista materiaaleista eniten mielenkiintoa herättävät tällä hetkellä YBCO ja  $MgB_2$ . YBCO:n suosio selittyy sen korkealla virrantiheydellä ja suuren normaalitilan resistiivisyydellä, mikä tekee siitä resistiivisiin vikavirranrajoittimiin erinomaisen materiaalin. YBCO-ohutfilmijohtimet ovat tällä hetkellä suosittuja tutkimuskohteita, sillä niiden avulla materiaalin valmistus tulee halvemmaksi.  $MgB_2$  on taas hyvin tuore materiaali suprajohteiden joukossa, mikä tarkoittaa, että tutkimusta on vielä tekemättä. Suurin innostus materiaalin kehittämiseen tulee sen erittäin halvasta hinnasta ja yksinkertaisuudesta.

Suprajohtavien vikavirranrajoittimien valmistuskustannukset ovat laskeneet tekniikan kehittyessä, sillä niin käytettävien suprajohtomateriaalien kuin järjestelmien

jäähdytyslaitteiden aiheuttamat kustannukset ovat alhaisempia kuin vain muutama vuosi sitten. Tekniikan kehitys on myös mahdollistanut yhä suurempitehoisten järjestelmien suunnittelun. Vielä on kuitenkin muutamia kohtia, joihin pitää kiinnittää huomiota jotta järjestelmät ovat kilpailukykyisiä perinteisten menetelmien kanssa. Näitä ovat muun muassa AC-häviöiden pienentäminen ja palautusaikojen lyhentäminen. SCFCL:n kilpailukyky riippuu myös niiden koosta ja eliniästä, jotka on saatava samalle tasolle vanhojen järjestelmien kanssa.

Merituulipuistot olisivatkin juuri tämän takia erinomainen mahdollisuus hyödyntää uutta suprajohdeteknologiaa, sillä kyseisen tason energiantuotantoon ei perinteisiä järjestelmiä juuri ole. Lisäksi SCFCL:n kaltaisen teknologian lisääminen merituulivoimalakonseptiin olisi helpompaa kuin sen lisääminen hyväksi todettuun sähköjakeluverkkoon mantereella.

Tässä työssä oli tavoitteena suunnitella suprajohtava vikavirranrajoitin hajautetun energiantuotannon osana olevaan merituulivoimalaan. Rajoittimen piti täyttää vaatimukset, jotka asetti Suomeen rakennettava suunnitelmavaiheessa oleva merituulipuisto. Tutkimuksen aikana selvitettiin, minkälaisia suprajohtavia vikavirranrajoittimia on suunniteltu, sekä katsastettiin soveltuvia materiaaleja ja niiden markkinoita. Resistiivisen laitteen mallintamisessa havaittiin, että kyseiset ominaisuudet omaava laite on mahdollista toteuttaa, mutta suprajohtavaa materiaalia tarvitaan paljon. Induktiivisen vikavirranrajoittimen tapauksessa mallinnuksessa päästiin asetettuihin raja-arvoihin, ja todettiin laitteen toteuttamismahdollisuuksien olevan hyvät. Verrattaessa sitä resistiiviseen vaihtoehtoon, se häviää suuren kokonsa puolesta, mutta nopeudessaan se on parempi. Kummallakin järjestelmällä on varmasti tulevaisuutta eri konsepteissa, sillä nämä erilaiset ominaisuudet varmasti kiinnostavat sähköntuottajia, ja tekniikka voidaan valita käyttökohteen mukaan.

Sähköverkkojen kehitys vaatii tulevaisuudessa uutta teknologiaa, vaikka riskit sen käyttöönotossa ovatkin olemassa. Sähkönkulutus kasvaa ja samoin myös verkoissa tapahtuvat vikavirrat, joten suojalaitteita tarvitaan yhä enemmän. Jos tässä työssä käsitelty suprajohtavat vikavirranrajoittimet jatkavat kehitystään ja niistä saadaan valmistettua varmatoimisia ja kohtuuhintaisia, on mahdollista, että juuri kyseinen konsepti korvaa vanhentuvat perinteiset järjestelmät tulevaisuudessa.

## 8. LÄHTEET

[1] International Energy Agency, The Impact of the Financial and Economic Crisis on Global Energy Investment, 2009, 66 s. (Viitattu 16.6.2009) Verkossa:

[http://www.iea.org/papers/2009/G8\\_FinCrisis\\_Impact.pdf](http://www.iea.org/papers/2009/G8_FinCrisis_Impact.pdf)

[2] Energiateollisuus ja Elinkeinoelämän keskusliitto, Arvio sähkön kysynnästä vuonna 2030, 2009, 23 s. (Viitattu 3.11.2009) Verkossa:

<http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/julkaisut%20ja%20tutkimukset/liitteet/arvio%20s%C3%A4hk%C3%B6n%20kysynn%C3%A4st%C3%A4%20vuonna%202030.pdf>

[3] Vartiainen E., Luoma P., Hiltunen J. & Vanhanen J. 2002, Hajautettu energiantuotanto: teknologiat, polttoaineet, markkinat ja CO<sub>2</sub>-päästöt, Edita Oy, Helsinki, Suomi, 90 s.

[4] Jyrinsalo, J. Lakervi, E. Planning the islanding scheme of a regional power producer, Electricity Distribution, 1993. CIRED. 12th International Conference.

Verkossa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=225731&isnumber=5891>

[5] Bergman, J-P. Lankila, M. Kässi, T. Teknologiaohjelma DENSY - Hajautetun energiantuotannon tulevaisuusskenaariot ja vaikutukset liiketoimintamalleihin, Tutkimusraportti 7, 2005. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, 116 s.

[6] Lakervi, E. Partanen, J. Sähkönjakelutekniikka, Otatieto 609, 2008, 285 s.

[7] Ranta, T. Hajautettu vai keskitetty energiantuotanto? Kuntien 4. ilmastokonferenssi, Tampere, 6-7.5.2008 (Viitattu 15.6.2009) Verkossa:

<http://www.kunnat.net/attachment.asp?path=1;29;356;1033;155519;126636;138074;138080;138082>

[8] Bergman, J-P. Lankila, M. Kässi, T. Teknologiaohjelma DENSY - Hajautetun energiantuotannon tulevaisuusskenaariot ja vaikutukset liiketoimintamalleihin,

Tutkimusraportti 9, 2006. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu



- [9] Vakkilainen, P. Vesitalouden verkkokirja, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos, TKK. (Viitattu 20.6.2009) Verkossa:  
<http://www.water.tkk.fi/wr/kurssit/verkkokirja/sisallys.html>
- [10] Kumpulainen, L. Laaksonen, H. Komulainen R. Martikainen, A. Lehtonen, M. Heine, P. Silvast, A. Imris, P. Partanen, J. Lassila, J. Kaipia, T. Viljainen, S. Verho, P. Järventausta, P. Kivikko, K. Kauhaniemi, K. Lågland, H. Saaristo, H. Verkkovisio 2030 – Jakelu- ja alueverkkojen teknologiavisio. VTT tiedotteita, Espoo, 2006, 88 s.
- [11] Mäki, K. Keskijänniteverkkoon liitetyn hajautetun tuotannon vaikutus johtolähtöjen oikosulkusuojaukseen, 2004. Tampereen teknillinen yliopisto, 65 s.
- [12] Nyberg, J. Tuulivoimaloiden verkkoonliittämisen vaatimukset jakeluverkon suojauksen kannalta, 2002. Tampereen teknillinen yliopisto, 101 s.
- [13] Kumpulainen, L. Ristolainen, I. Sähkönjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähköteknisen suojauksen kehittäminen, 2006. VTT Projektiraportti, 144 s.
- [14] Dugan, R.C. McDermott, T.E. Operating conflicts for distributed generation on distribution systems, Rural Electric Power Conference, 2001.  
 Verkossa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=949511&isnumber=20541>
- [15] Mäki, K. Hajautettua tuotantoa sisältävän sähkönjakeluverkon suojauskysymykset, 2007. Tampereen teknillinen yliopisto, 7 s.
- [16] Kalmari, J. Maatilakohtaisen biokaasulaitosinvestoinnin kannattavuus suomalaisella sikatilalla, 2006. Helsingin yliopisto. (Viitattu 6.7.2009) Verkossa:  
<http://www.mm.helsinki.fi/mmtal/abs/Selv42.pdf>
- [17] Peura, P. (toim.) Maaseudun voima -Tutkimus hajautetusta energiantuotannosta, 2007. Vaasan yliopisto, Levón-instituutti, 189 s.
- [18] Vuoden 2008 ilmasto- ja energiastrategia, 2008. Työ- ja elinkeinoministeriö, 130 s.
- [19] Vanhanen, J. Hajautetun energiatuotannon edistäminen, 2008. Gaia Group Oy. (Viitattu: 7.7.2009) Verkossa:  
[http://www.tem.fi/files/19381/Hajautetun\\_tuotannon\\_edistaminen\\_Juha\\_Vanhanen\\_29.2.2008.pdf](http://www.tem.fi/files/19381/Hajautetun_tuotannon_edistaminen_Juha_Vanhanen_29.2.2008.pdf)
- [20] Tinkham, M. Introduction to superconductivity, 2. ed. 2004, Dover Books on Physics. 408 s.

- [21] Sheahen, T P. Introduction to high-temperature superconductivity, 1994, Springer. 598 s.
- [22] Ohanian, H. Physics, 2. ed. Expanded, 1989, WW Norton, 570 s.
- [23] Superconductors.org, Superconductor Information for the Beginner. (Viitattu 20.7.2009) Verkossa: <http://www.superconductors.org/>
- [24] Rostila, L. Suprajohtava generaattorikisko Olkiluodon ydinvoimalaan, Magneettiteknologiakeskuksen miniseminaari 8.2.2008 (Viitattu 19.7.2009) Verkossa: <http://www.prizztech.fi/linkkitiedosto.aspx?taso=2&id=194&sid=491>
- [25] SPIN, institute for SuPerconductivity and INnovative materials, Superconducting Cables. (Viitattu: 27.7.2009) Verkossa: [http://www.lamia.infm.it/superconducting\\_cables.htm](http://www.lamia.infm.it/superconducting_cables.htm)
- [26] Paturi, P. Suprajohtavuuden sovellukset, 2003. Turun yliopisto, verkko-opiskelumateriaali. (Viitattu: 29.7.2009) Verkossa: <http://users.utu.fi/peetu/super/>
- [27] Rossi L. Superconducting Cable and Magnets for the Large Hadron Collider, LHC Project Report 694, 6th European Conference on Applied Superconductivity, 2003. 9 s. (Viitattu 29.7.2009)
- [28] Alakangas, E. Jussila J. (toim.) Ilmastonmuutoksen hillinnän liiketoimintamahdollisuudet ClimBus-teknologiaohjelman katsaus 2006, Tekes, Helsinki. 264 s.
- [29] Hartikainen, T. Environmental Impacts of Superconducting Power Applications, Tampereen teknillinen yliopisto, julkaisu 553. Tampere, 2005. 132 s.
- [30] Noe, M. Steurer, M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status, 2007. Superconductor Science and Technology, 20 3,2007. (Viitattu: 22.7.2009) Verkossa: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/20/3/R01>
- [31] Kado, H. Ichikawa, M. Performance of A High-Tc Superconducting Fault Current Limiter - Design of A 6.6kV Magnetic Shielding Type Superconducting Fault Current Limiter, Applied Superconductivity, IEEE Transactions, vol.7, no.2, pp.993-996, 1997 (Viitattu: 27.8.2009) Verkossa: <http://dx.doi.org/10.1109/77.614672>

- [32] Guo, Y-H. Yokomizu, Y. Matsumura, T. Design Guidelines of a Flux-Lock Superconducting Fault Current Limiter with ac Magnetic Field Coil for a 6.6-kV Distribution System, *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 135, No. 4, 2001. (Viitattu: 31.8.2009) Verkossa: <http://dx.doi.org/10.1002/eej.1038>
- [33] Schwall, R. WTEC Panel Report on Power Applications of Superconductivity in Japan and Germany, *Power Systems -- Other Applications*. 1997. (Viitattu 31.8.2009) Verkossa: [http://www.wtec.org/loyola/scpa/04\\_03.htm](http://www.wtec.org/loyola/scpa/04_03.htm)
- [34] Matsumura, T. Mutsuura, K. Yokomizu, Y. Iio, D. Shimizu, H. Shibuya, M. Kado, H. Ichikawa, M. Theoretical Calculation of Inductance of Flat Type Fault Current Limiter with High Tc Superconducting Plate, 2006. 7th European Conference on Applied Superconductivity. (Viitattu 17.8.2009) Verkossa: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/43/1/235>
- [35] Elschner, S. Breuer, F. Walter, H. Bock, J. Magnetic Field Assisted Quench Propagation as a New Concept for Resistive Current Limiting Devices. *Journal of Physics: Conference Series* 43, 2006, pp. 917-920.
- [36] Okubo, H. et al., Development and Application Trend of Superconducting Materials and Electrical Insulation Techniques for HTS Power Equipment, *CIGRE SC D1-306*, 2006.
- [37] Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia - Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008. Työ- ja elinkeinoministeriö. 130 s.
- [38] Holttinen, H. Stenberg, A. Tuulivoiman tuotantotilastot: vuosiraportti 2008, VTT working papers 132, 2009. 47s.
- [39] Tuulivoima - tiekartta viennin edistämiseksi. Teknologiateollisuus, Tuulivoima-alan toimittajat, 2005.
- [40] VTT-katsaus 2008. Verkossa: <http://www.vtt.fi/files/vtt/vk08.pdf>
- [41] Rovio, T. Viljamaa, J. Suprajohtava generaattori tuulivoimalassa, magneettiteknologiakeskuksen miniseminaari 8.2.2008. (Viitattu 5.9.2009)
- [42] EWEA annual report 2008. Winning with European Wind Creating power, helping the environment (Viitattu: 29.9.2009) Verkossa: [http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/Annual\\_Report\\_2008.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/Annual_Report_2008.pdf)

- [43] Kallava, T. Tuulivoimaloiden generaattori- ja sähkökäyttövaihtoehtojen vertailu, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, sähkötekniikan osasto, sähkökäyttöjen seminaari, 2006. 24 s.
- [44] The European Environment Agency EEA Europe's onshore and offshore wind energy potential, Technical report No 6/2009. 90 s. Verkossa: <http://www.eea.europa.eu/publications/europes-onshore-and-offshore-wind-energy-potential>
- [45] Weckman, E. Tuulivoimalat ja maisema, Suomen ympäristö 5/2006, ympäristöministeriö 2006. 42 s.
- [46] Holttinen, H. Liukkonen, S. Furustam, K-J. Haapanen, E. Holttinen, E. Offshore-tuulivoimala Perämeren jääolosuhteissa, VTT-julkaisu 828, 1998. Verkossa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1998/J828.pdf>
- [47] Komission tiedonanto neuvostolle ja Euroopan parlamentille - Uusiutuvien energialähteiden osuus EU:ssa - Direktiivin 2001/77/EY 3 artiklan mukainen Komission kertomus, arvio lainsäädännön ja muiden yhteisön toimenpiteiden vaikutuksista uusiutuvien energialähteiden osuuteen EU:ssa sekä ehdotuksia konkreettisiksi toimiksi {SEK(2004) 547}
- [48] Offshore Wind Energy Europe OWE – Information for Professionals: Expert Guides. Verkossa: <http://www.offshorewindenergy.org/>
- [49] EWEA Offshore Report 2009: Oceans of Opportunity - Harnessing Europe's largest domestic energy resource, 2009. Verkossa: [http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/reports/Offshore\\_Report\\_2009.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/Offshore_Report_2009.pdf)
- [50] EWEA: Offshore Wind Farms 2008. Verkossa: [http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/statistics/Offshore\\_Wind\\_Farms\\_2008.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/statistics/Offshore_Wind_Farms_2008.pdf)
- [51] Holmstrøm, O. Barberis Negra, N. Survey of Reliability of Large Offshore Wind Farms, European Wind Energy Conference, Milano, Italia, 7-10.5.2007.
- [52] Wind power projects in Finland, Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 2009. (Viitattu: 20.11.2009) Verkossa: [http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoimayhdistys/files/Tuulivoimaloiden%20hankelista\\_STY\\_VTT\\_150909.pdf](http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoimayhdistys/files/Tuulivoimaloiden%20hankelista_STY_VTT_150909.pdf)

- [53] Mäki, K. Tuulivoima ja sähköverkko, 2009, Tampereen teknillinen yliopisto, sähköenergiatekniikan laitos, vierailuluennon luentokalvot. 31 s.
- [54] Kivinen, J. Hajautetun sähköntuotannon verkostovaikutukset, kandityö, Lappeenranta 2008, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, sähkötekniikan osasto. 39 s.
- [55] Wpd Finland Oy, Suurhiekan merituulipuisto ja sähkönsiirron reittivaihtoehdot, ympäristövaikutusten arviointiselostus, maaliskuu 2009. 420 s.
- [56] Lund, P. Paatero, J. (toim.) Kehittynyt tuulivoimateknologia, Teknillisen korkeakoulun teknillisen fysiikan julkaisu, Espoo 2003. 166 s.
- [57] Partanen, J. Sähköenergiatekniikan perusteet, 1998. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- [58] Halonen, M. Sähkönjakeluverkon keskeytykset, keskeytystilastointi ja toimitustakuut, 2000. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 21 s.
- [59] Matsumura, T.; Sugimura, M.; Yokomizu, Y.; Shimizu, H.; Shibuya, M.; Ichikawa, M.; Kado, H.; , "Generating performance of limiting impedance in flat type of fault current limiter with high Tc superconducting plate," Applied Superconductivity, IEEE Transactions on , vol.15, no.2, pp. 2015- 2018, June 2005 (Viitattu: 30.11.2009)  
Verkossa: <http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2006.849440>
- [60] Usoskin, A.; Rutt, A.; Knoke, J.; Krauth, H.; Arndt, T., "Long-length YBCO coated stainless steel tapes with high critical currents," Applied Superconductivity, IEEE Transactions on , vol.15, no.2, pp. 2604-2607, June 2005  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1440199&isnumber=31008>
- [61] Poulsen, L. HTS-2006, Part A: Superconducting wires and tapes; Materials, manufacturing and costs. Magneettiteknologiakeskus Prizztech Ltd, Pori, 2007, 33s.
- [62] Rostila, L. Electromagnetic design of superconducting coated conductor power cables. Tampereen teknillinen yliopisto, julkaisu 727, 2008, 422 s.
- [63] Alecu, G. Crystal Structures of Some High Temperature Superconductors, Romanian Reports in Physics, Volume 56, No. 3, P. 404 - 412 , 2004
- [64] Bruker HTS GmbH, YBCO Coated Tapes Datasheet. Verkossa: <http://www.bruker-est.com/ybco-tapes.html>

[65] American Superconductor: 344 Superconductors Type 344S: Stainless steel stabilized YBCO second generation HTS wire, Fact Sheet. Verkossa: <http://www.amsc.com/products/htswire/index.html>

[66] SuperPower Inc. 2G HTS Wire Spec Sheet SF12050/SF12100. Verkossa: <http://www.superpower-inc.com/content/products>

[67] Chen M, Donzel L, Lakner M, Paul W, High temperature superconductors for power applications, Journal of the European Ceramic Society, Volume 24, Issue 6, Electroceramics VIII, 2004, Pages 1815-1822, Verkossa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TX0-49FR74T-18/2/9708078fb7d1718685e50bc82cd75ddb>

[68] S. X. Dou, S. Soltanian, J. Horvat, X. L. Wang, S. H. Zhou, M. Ionescu, H. K. Liu, P. Munroe, M. Tomsic; Applied Physics Letters 81 (2002) 3419

[69] Columbus Superconductors SpA, details about MgB<sub>2</sub>. Verkossa: <http://www.columbussuperconductors.com/>

[70] Funaki K, Kubo T, Nakao A, Sato S, Matsuo M, Kajikawa K, Tanaka K, Okada M, Kumakura H, Hayashi H: "Quantitative Analysis of Normal Zone Propagation in MgB<sub>2</sub> Superconducting Wires". TEION KOGAKU, Vol. 43, pp.423-429 (2008)

[71] A Stenvall, A Korpela, R Mikkonen and G Grasso, Stability considerations of multifilamentary MgB<sub>2</sub> tape, 2006 Supercond. Sci. Technol. 19 184-189

[72] Nagamatsu J, Nakagawa N, Muranaka T, Zenitani Y, Akimitsu J. Superconductivity at 39 K in magnesium diboride. Nature [serial on the Internet]. (2001, Mar), 410(6824): 63.

[73] Hyper Tech Research, Inc. Superconductors for Medical and Energy Products, Products and Capabilities. Verkossa: <http://www.hypertechresearch.com/index.html>

[74] Noe M. Superconducting fault current limiters (SCFCLs). Summer school on Materials and Applications on Superconductivity, Karlsruhe, 2007, 74 s.

[75] Xuhong, Z. Youqing, Z. Zhifeng Z. Design of saturated iron core superconducting fault current limiter based on numerical calculation, Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES , vol., no., pp.1-5, 2005 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1546761&isnumber=33009>

- [76] Wilson M.N. Supreconducting Magnets, London: Oxford UP
- [77] Applied Superconductivity Center. Verkossa:  
<http://www.magnet.fsu.edu/magnettechnology/research/asc/overview.html> (Viitattu 16.10.2009).
- [78] Nakagawa H. et al. J. Phys. Condens. Matter, 1998. 10.11571-11576.
- [79] Buzea C. Yamashita T. 2001 Supercond. Sci. Technol. 14. R115-R146.
- [80] Lee P.J. Larbalestier P.C. Proceedings of International workshop on Nb-based Superconductors. 2004.
- [81] Garcia F. et al. 1997 EUCAS 97.
- [82] American Superconductor. Verkossa: <http://www.amsc.com/> (Viitattu 16.10.2009).
- [83] Kasap, S.O. Capper, P. Springer handbook of electronic and photonic materials, Springer 2007. 1406 s.
- [84] Sargent, P. Capital Costs May Make YBCO Coated Conductor Cost-Prohibitive, Superconductor Week Issue Vol.20 No.02, 2006.
- [85] Tuominen, V. Suprajohtavuuden hyödyntäminen virranrajoittimissa. Diplomityö. Tampere 2009, Tampereen teknillinen yliopisto. 104 s.
- [86] Haghifam, M.R. Ghaderi, A. Abapour, M. Enhancement circuit breaker reliability by using fault current limiter, Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE , vol., no., pp.1-5, 26-30 July 2009
- [87] Noe, M.; Oswald, B.R. Technical and economical benefits of superconducting fault current limiters in power systems, Applied Superconductivity, IEEE Transactions on , vol.9, no.2, pp.1347-1350, Jun 1999
- [88] Chang H-M. Kim Y. S. Kim H. M.; Lee H. Ko T. K. Current-Lead Design for Cryocooled HTS Fault Current Limiters, Applied Superconductivity, IEEE Transactions on , vol.17, no.2, pp.2244-2247, June 2007
- [89] Cha, Y.S. Semi-empirical correlation for quench time of inductively coupled fault current limiter, Applied Superconductivity, IEEE Transactions on , vol.15, no.2, pp. 1974- 1977, June 2005

[90] Noe, M. Juengst, K.-P. Elschner, S. Bock, J. Breuer, F. Kreutz, R. Kleimaier, M. Weck, K.-H. Hayakawa, N. High voltage design, requirements and tests of a 10 MVA superconducting fault current limiter, *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* , vol.15, no.2, pp. 2082- 2085, June 2005

[91] Grilli, F. Martini, L. Stavrev, S. Dutoit, B. Brambilla, R. Analysis of magnetic field and geometry effects for the design of HTS devices for AC power applications, *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* , vol.15, no.2, pp. 2074- 2077, June 2005